

4-12-2023

Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Energy-saving Scheduling Considering Delivery Time

Hongliang Zhang

1.Key Laboratory of Multidisciplinary Management and Control of Complex Systems of Anhui Higher Education Institutes (Anhui University of Technology), Ma'anshan 243032, China;2.School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China,; hlzhang@ahut.edu.cn

Jingru Xu

2.School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

Bo Tan

3.School of Intelligent Manufacturing Engineering, Ma'anshan University, Ma'anshan 243100, China;

Gongjie Xu

2.School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Energy-saving Scheduling Considering Delivery Time

Abstract

Abstract: To handle the flexible job shop energy-saving scheduling with machines and workers constraints, *on the considering of delivery time, the optimization model of dual resource constrained flexible job shop energy-saving scheduling is established with the goal of minimizing the total earliness and tardiness penalties, and total energy consumption. An improved non-dominated sorting genetic algorithm II(INSGA-II) is proposed. Aiming at the optimized objectives, a three-stage decoding method is designed to gain more feasible solutions. The dynamic adaptive crossover and mutation operators are applied to get more excellent individuals. The crowding distance is improved to obtain a population with better convergence and distribution.* The result of comparing INSGA-II with several other multi-objective optimization algorithms, verifies the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords

dual resource constrains, flexible job shop, earliness/tardiness penalties, energy consumption, INSGA-II(improved non-dominated sorting genetic algorithm II)

Recommended Citation

Hongliang Zhang, Jingru Xu, Bo Tan, Gongjie Xu. Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Energy-saving Scheduling Considering Delivery Time[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 734-746.

考虑交货期的双资源柔性作业车间节能调度

张洪亮^{1,2}, 徐静茹², 谈波³, 徐公杰²

(1. 复杂系统多学科管理与控制安徽省普通高校重点实验室(安徽工业大学), 安徽 马鞍山 243032; 2. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 3. 马鞍山学院 智造工程学院, 安徽 马鞍山 243100)

摘要: 为解决含有机器和工人双资源约束的柔性作业车间节能调度问题, 在考虑交货期的基础上, 建立了以总提前和拖期惩罚值及总能耗最小为目标的双资源柔性作业车间节能调度模型。提出了一种改进的非支配排序遗传算法(improved non-dominated sorting genetic algorithm II, INSGA-II)进行求解。针对所优化的目标, 设计了一种三阶段解码方法以获得高质量的可行解; 利用动态自适应交叉和变异算子以获得更多优良个体; 改进拥挤距离以获得收敛性和分布性更优的种群。将 INSGA-II 与多种多目标优化算法进行对比分析, 实验结果表明所提算法可行且有效。

关键词: 双资源约束; 柔性作业车间; 提前/拖期惩罚; 能耗; INSGA-II(improved non-dominated sorting genetic algorithm II)

中图分类号: TP18; TH165 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)04-0734-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1306

引用格式: 张洪亮, 徐静茹, 谈波, 等. 考虑交货期的双资源柔性作业车间节能调度[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 734-746.

Reference format: Zhang Hongliang, Xu Jingru, Tan Bo, et al. Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Energy-saving Scheduling Considering Delivery Time[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 734-746.

Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Energy-saving Scheduling Considering Delivery Time

Zhang Hongliang^{1,2}, Xu Jingru², Tan Bo³, Xu Gongjie²

(1. Key Laboratory of Multidisciplinary Management and Control of Complex Systems of Anhui Higher Education Institutes (Anhui University of Technology), Ma'anshan 243032, China; 2. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; 3. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Ma'anshan University, Ma'anshan 243100, China)

Abstract: To handle the flexible job shop energy-saving scheduling with machines and workers constraints, on the considering of delivery time, the optimization model of dual resource constrained flexible job shop energy-saving scheduling is established with the goal of minimizing the total earliness and tardiness penalties, and total energy consumption. An improved non-dominated sorting genetic algorithm II(INSGA-II) is proposed. Aiming at the optimized objectives, a three-stage decoding method is designed to gain more feasible solutions. The dynamic adaptive crossover and mutation operators are applied to get more excellent individuals. The crowding distance is improved to obtain a population with better convergence and distribution. The result of comparing INSGA-II with several other multi-objective optimization algorithms, verifies the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: dual resource constrains; flexible job shop; earliness/tardiness penalties; energy consumption; INSGA-II(improved non-dominated sorting genetic algorithm II)

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2022-02-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71772002); 安徽普通高校重点实验室开放基金重点项目(CS2021-ZD01); 安徽省自然科学基金(2008085QG335)

第一作者: 张洪亮(1979-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为生产调度优化、精益生产与管理。E-mail: hlzhang@ahut.edu.cn

0 引言

制造业全球化进程中,资源环境问题日益突出,有效利用资源、减少制造过程中的能耗、降低生产对环境的影响,成为企业关注的热点。据《国际能源展望2021》统计,2021年,全球与能源相关的CO₂排放量较2020年增加了10亿吨,其中,工业部门的碳排放量最大,2020—2030年,全球能源消耗量将以年均1.7%的速度增长^[1]。在此背景下,制造企业科学制定生产调度方案,减少能源消耗和碳排放,推动节能减排,实现绿色制造迫在眉睫。

柔性作业车间调度问题(flexible job shop scheduling problem, FJSP)考虑了机器的柔性,降低了工序对资源的竞争。绿色制造背景下考虑能耗的FJSP引起了广大学者的关注,段建国等^[2]将2种启发式选择策略融入NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)中,优化以完工时间、产品加工能耗和起重机运输能耗最小为目标的FJSP;李聪波等^[3]在FJSP中考虑了产品加工中断的影响,设计了一种基于模拟退火框架的调度算法,对总能耗和完工时间进行优化;魏鑫等^[4]提出了一种改进的双元混合遗传算法,求解以最大完工时间和总能耗最小为优化目标的FJSP;陈超等^[5]针对考虑能耗和平均流经时间的FJSP,提出了一种遗传模拟退火算法进行求解;Jiang等^[6]提出了一种改进的非洲水牛算法,优化以总能耗最小为目标的FJSP;朱光宇等^[7]设计了一种改进的遗传算法,优化以总能耗、加工质量、完工时间和空闲时间最小为目标的FJSP。以上考虑能耗的FJSP研究为制造企业实现绿色可持续发展提供了参考,但只考虑了机器的柔性,未考虑工人约束。

在实际生产过程中,工件的加工需要机器和工人共同参与,在FJSP中同时考虑机器和工人的约束更加符合生产实际。Nelson^[8]在生产系统中考虑了设备和人力资源的约束,并将考虑这2种约束的问题称为双资源约束问题;郭鹏等^[9]设计了一种改进的Jaya算法,求解以最大完工时间最小为

目标的考虑工人熟练度的双资源柔性作业车间调度问题;Renna等^[10]基于博弈论中延迟接受的思想,提出了一种新的工人分配规则,对双资源约束系统中的工人分配问题进行研究;Zhu等^[11]研究了工人学习能力对加工时间和能源消耗的影响,设计了一种模因算法进行求解;Meng等^[12]考虑了空闲时间和空闲能耗,建立了2个混合整数线性规划模型,设计了一种可变邻域搜索算法,优化具有开/关策略的双资源柔性作业车间调度问题;Gong等^[13]提出了一种混合遗传算法,对同时考虑绿色生产指标、人因指标和时间指标的双资源柔性作业车间调度问题进行研究。上述文献从机器和工人的角度对FJSP进行研究,实现了机器和工人的合理分配,促进了企业绿色生产,但未考虑调度过程中产品的准时交付。

准时交付是精益生产的主要思想之一,按顾客需求进行生产,要求产品既不提前完成,造成企业额外的库存浪费,也不拖期交货,影响客户满意度。鉴于生产实际需求,考虑交货期的FJSP得到了研究人员的关注。Gao等^[14]针对以完工时间和平均提前/拖期时间最小为目标的FJSP,设计了一种离散和声搜索算法进行求解;Zhang等^[15]设计了一种基于遗传规划的代理辅助进化算法,优化以平均拖期、平均总流程时间和平均加权拖期最小为目标的FJSP;Piroozfard等^[16]研究了考虑碳足迹和总延迟工作准则的FJSP,并提出一种改进的多目标优化算法进行求解;姜天华等^[17]设计了一种离散猫群算法,优化考虑交货期的FJSP。将交货期和双资源柔性作业车间调度问题相融具有较强的实践价值,但会增加问题的复杂度,相关研究仍处于探索阶段。关叶青等^[18]针对设备和人力资源协同分配的多周期生产问题,建立了包含拖期成本在内的多目标柔性作业车间调度优化模型;李兢尧等^[19]设计了一种分支种群遗传算法,求解以完工时间和总成本最小为目标的双资源约束FJSP,总成本包括工人成本、提前/拖期惩罚成本及制造资源全额成本;Andrade等^[20]针对某汽车碰

撞修理厂中突发事件频发的问题，建立了以完工时间和平均延误期的加权值最小为目标的数学模型，提出了一种反向迭代贪婪算法。综上所述，在双资源柔性作业车间调度问题中尚未有学者集成考虑能耗、提前期和拖期。

由上述分析可知，在FJSP中同时考虑机器和工人约束更加符合实际生产状况，在生产过程中降低能耗，实现准时交付是企业可持续发展的关键。因此，本文研究了考虑交货期的双资源柔性作业车间节能调度问题(dual resource constrained flexible job shop energy-saving scheduling problem considering delivery time, DRCFJESP-DT)，以总提前和拖期惩罚值及总能耗最小为优化目标，设计了一种改进的非支配排序遗传算法(improved non-dominated sorting genetic algorithm II, INSGA-II)进行求解。将NSGA-II、Jaya算法和强帕累托优化算法(strength Pareto evolutionary algorithm 2, SPEA2)作为对比算法进行实验，通过多目标优化算法评价指标反世代距离(inverted generational distance, IGD)和集合覆盖率(set coverage, SC)对4种算法在16组测试算例下的计算结果进行对比分析，验证本文所提算法的有效性。

1 问题模型

1.1 问题描述

在调度过程中有 $n(J_1, J_2, \dots, J_n)$ 个工件、 $m(M_1, M_2, \dots, M_m)$ 台机器和 $w(W_1, W_2, \dots, W_w)$ 名工人， $m > w$ ，每个工件 J_i 包含 $v_i(i=1, 2, \dots, n)$ 道工序。可以加工工序 $O_{ij}(i \in 1, 2, \dots, n, j \in 1, 2, \dots, v_i)$ 的所有机器构成集合 M_{ij} ， $M_{ij} \subset M$ ，操作机器 $k(k \in M_{ij})$ 加工 O_{ij} 的工人构成集合 W_{ijk} ， $W_{ijk} \subset W$ ，工件、工人和机器的组合不同，加工时间不同。双资源柔性作业车间调度在满足工人约束、机器约束和工序约束的条件下，为每道工序确定最佳机器和工人组合以及最佳开始时间。本文的目标为最小化总提前和拖期惩罚值及总能耗，为了更好地解决问

题，给出如下假设：

- (1) 所有工件、工人和机器均可从0时刻开始加工；
- (2) 不同工件之间没有顺序约束；
- (3) 每个工人可以操作多台机器，每台机器可以加工多个工件；
- (4) 同一时刻，1名工人只能操作1台机器处理1个工件；
- (5) 任一工件在同一时刻，只能在1台机器上由1名工人加工，加工过程无抢占；
- (6) 工人的移动时间忽略不计。

1.2 符号定义

为了更好地表述模型，定义相关符号变量。

n : 工件总数量； m : 机器总数量； w : 工人总数量； J : 待加工工件集； M : 机器集； W : 工人集； i, s : 工件号； j, t : 工序号； k : 机器号； r : 工人号； L : 足够大的正数； α, β : 工件的提前、拖期惩罚系数； d_{1i}, d_{2i} : 工件 i 交货时间区间下限和上限； ME : 总加工能耗； RE : 总空闲能耗； PE : 总公共能耗； TE : 总能耗； FE, FL : 工件总提前惩罚值，总拖期惩罚值； FEL : 生产过程中总提前和拖期惩罚值； v_i : 工件 J_i 的总工序数； t_{ijk} : 工序 O_{ij} 在机器 k 上由工人 r 加工的时间； S_{ij} , E_{ij} : 工序 O_{ij} 的开始时间和结束时间； T_{kr} : 工人 r 可以操作机器 k 的开始时间； C_i : 工件 J_i 的完工时间； Me_k : 机器 k 的单位时间加工功率； Re_k : 机器 k 的单位时间空闲功率； Pe : 调度过程中单位时间公共功率。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{工人 } r \text{ 在机器 } k \text{ 上加工工序 } O_{ij} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$\delta_{ijst} = \begin{cases} 1, & O_{ij} \text{ 先于 } O_{st} \text{ 在机器 } k \text{ 上加工, 两工序相邻} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{k'kr} = \begin{cases} 1, & \text{工人 } r \text{ 先操作机器 } k' \text{ 再操作机器 } k \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$i, s = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, v_i, t = 1, 2, \dots, v_s \\ k, k' = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, w$$

1.3 建立模型

基于以上假设建立数学模型。

式(1)和(2)为优化目标, 分别表示总提前和拖期惩罚值最小及总能耗最小:

$$f_1 = \min(FEL) \quad (1)$$

$$f_2 = \min(TE) \quad (2)$$

s.t.

工序加工过程连续:

$$E_{ij} - S_{ij} = \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^w x_{ijk} \cdot t_{ijk} \quad (3)$$

工件的工序约束:

$$S_{i(j-1)} - S_{ij} \geq \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^w x_{ijk} \cdot t_{ijk} \quad (4)$$

同一时刻1名工人只能在1台机器上加工1道工序:

$$S_{st} + L(1 - \delta_{ijst}) \geq E_{ij} \quad (5)$$

$$T_{kr} + L(1 - \varepsilon_{k'kr}) \geq T_{k'r} \quad (6)$$

对于任意1道工序, 在对应加工机器和工人准备好之前不能开始加工:

$$T_{kr} + L(x_{ijk} - 1) \leq S_{ij} \quad (7)$$

任一工序只能由1名工人在1台机器上完成:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^w x_{ijk} = 1 \quad (8)$$

车间调度总能耗、总加工能耗、总空闲能耗和总公共能耗:

$$TE = ME + RE + PE \quad (9)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{v_i} \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^w x_{ijk} \cdot Me_k \cdot t_{ijk} \quad (10)$$

$$RE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{v_i} \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^w x_{ijk} \cdot Re_k \cdot (S_{st} - E_{ij}) \cdot \delta_{ijst} \quad (11)$$

$$PE = Pe \times (\max_{1 \leq i \leq n} C_i) \quad (12)$$

工件总提前和拖期惩罚值、工件总提前惩罚值和工件总拖期惩罚值:

$$FEL = FE + FL \quad (13)$$

$$FE = \alpha \sum_{i=1}^n (d_{1i} - C_i) \quad (14)$$

$$FL = \beta \sum_{i=1}^n (C_i - d_{2i}) \quad (15)$$

工件、工人和机器均可从0时刻开始加工, 并且任一工件的加工时间大于0:

$$S_{ij} \geq 0, t_{ijk} > 0, T_{kr} \geq 0 \quad (16)$$

2 算法设计

2.1 种群初始化

不同的种群初始化方法导致初始解质量的差异, 进而影响算法的性能。随机生成初始种群的方法虽然可以得到更加多样化的解, 但是解的质量并不稳定, 因此, 本文采用随机生成和策略选择相结合的方法产生初始种群。DRCFJESP-DT的机器选择部分根据最短加工时间规则采用全局选择、局部选择和随机选择相结合的方式, 概率分别为60%、30%和10%^[21]; 在此基础上, 为机器分配可用的加工时间最短的工人, 得到工人分配序列; 工序部分采用随机方式生成。

2.2 三阶段编码

针对DRCFJESP-DT模型的特性, 设计了1种三阶段编码方式, 每条染色体包含3个部分: 工序排序(OS)序列、机器选择(MA)序列和工人分配(WA)序列, 各序列长度为工件的总工序数, 每1个编码方案代表DRCFJESP-DT的1个可行解。3工件、3机器、2工人、每个工件3道工序的调度问题编码如图1所示, OS序列中的第5个数字2, 第2次出现, 表示工序 O_{22} ; MA序列中的第5个数字3, 表示 O_{22} 可选机器集中的第3台机器; WA序列中的第5个数字2, 表示加工 O_{22} 的工人是该工序对应机器可选工人集中的第2名工人。

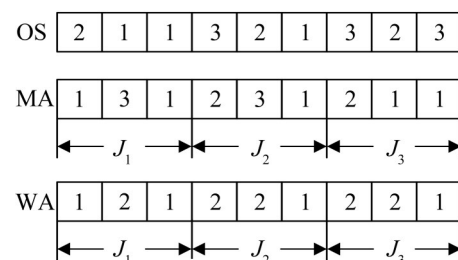


图1 三阶段编码
Fig. 1 Three-stage coding

2.3 三阶段解码

由于DRCFJESP-DT同时考虑了提前和拖期惩罚，只考虑拖期惩罚的双资源柔性作业车间调度问题解码方法不再适用，因此，设计了1种三阶段解码方法。首先，采用一般解码方式，自左向右依次安排工序进行操作，获得半主动调度结果；然后，依据半主动调度结果，利用间隙挤压法依次对拖期工件解码，获得主动解码结果；最后，根据主动调度结果，对染色体序列实行逆转操作，对提前完工的工件，在保持其余工件加工位置和时间不变的条件下，通过间隙挤压法从工件的最后一道工序开始进行解码操作。三阶段解码方法具体步骤如下：

step 1: 根据OS序列、MA序列和WA序列确定待加工工件、加工工件的机器和工人，依次安排加工获得半主动调度结果，加工过程要保证机器和工人同时可用，工件才能开始加工。

step 2: 找出拖期工件和提前完工工件，若无工件拖期，转step 6，否则，继续step 3。

step 3: 依据半主动调度结果，从OS序列、MA序列和WA序列中提取出拖期工件的工序 O_{ij} 、加工 O_{ij} 的机器 M_k 和工人 W_r ，以及 O_{ij} 的加工时间 t_{ijkr} 。

step 4: 分别遍历机器 M_k 和工人 W_r 上的空闲时间区间，得到二者之间的公共空闲时间区间 $[TS, TF]$ ，根据式(17)~(19)判断工序 O_{ij} 是否可以插入公共空闲时间区间。如果可以插入，工序 O_{ij} 的最早开始时间可以通过式(20)得到，否则转到step 5。

$$IT = TF - TS \quad (17)$$

$$t_{ijkr} \leq IT \quad (18)$$

$$E_{i(j-1)} + t_{ijkr} \leq TF \quad (19)$$

$$S_{ij} = \max(E_{i(j-1)}, TS) \quad (20)$$

step 5: 若不满足插入条件，根据机器 M_k 上的空闲时间区间 $[TS_{mk}, TF_{mk}]$ 和工人 W_r 上的空闲时间区间 $[TS_{wr}, TF_{wr}]$ ，通过式(21)确定工序 O_{ij} 的

最早开始时间。

$$S_{ij} = \max\{E_{i(j-1)}, TF_{mk}, TF_{wr}\} \quad (21)$$

step 6: 拖期工件重新排列完毕，找出所有提前工件，若无工件提前，跳转step 10。

step 7: 对提前工件执行逆向解码操作。基于逆转后的染色体序列，通过式(22)得到逆转后的相对坐标原点 oig ， d_{2i}^c 表示提前工件的交货时间上限， C_s 表示其余工件的完工时间。各工件的最早开始时间可以通过式(23)和式(24)求解得到，其中 rd_e 与 rd_o 分别表示提前工件和非提前工件的最早开始时间。

$$oig = \max(Q_e, Q_o) \quad (22)$$

其中， $Q_e = \max(d_{2i}^c)$ ， $Q_o = \max(C_s)$

$$rd_e = oig - d_{2i}^c \quad (23)$$

$$rd_o = oig - C_s \quad (24)$$

step 8: 重新确定逆转后工件各工序的开始和结束时间，机器和工人的空闲时间，从OS序列、MA序列和WA序列中提取出提前完工的工件对应的工序 O_{st} ，确定加工 O_{st} 的工人 W_r 和机器 M_k 及加工时间 t_{stkr} ，对于提前完工的工件，解码操作与step 3~5一致。

step 9: 提前工件安排结束，还原染色体序列以获得最终解码结果，即工件的加工顺序和完工时间，重新判断拖期工件和提前工件。

step 10: 计算总提前和拖期惩罚值以及总能耗，若满足终止条件，则结束循环，否则转至step 2。

2.4 改进的拥挤距离算子

拥挤距离反映了同一非支配水平上解的分布状况，以往的拥挤距离计算方法虽然提高了种群的多样性，但还是存在陷入局部最优，分布不均匀的状况。因此，采用一种改进拥挤距离计算方法^[22]，引入新的变量 c 和 f ， c 反映了个体目标函数的优劣， c 值越大，收敛速度越快，目标函数越优； f 反映了种群分布的均匀性， f 值越大，分布越均匀。

$$c = \frac{f_{n+1}^k - f_n^k}{f_{\max}^k - f_{\min}^k} \quad (25)$$

$$f = \frac{(f_{n+1}^k - f_n^k)(f_n^k - f_{n-1}^k)}{(f_{\max}^k - f_{\min}^k)^2} \quad (26)$$

式中: k 为要优化的目标个数; f_{\max}^k 和 f_{\min}^k 为第 k 个目标的最大值和最小值。改进后的拥挤距离为

$$d(n) = d(n) + c \cdot f \cdot \frac{f_{n+1}^k - f_{n-1}^k}{f_{\max}^k - f_{\min}^k} \quad (27)$$

2.5 自适应交叉算子

在大多数双资源柔性作业车间调度问题的研究中, 交叉概率被设为固定值 $0.8^{[12, 23-25]}$ 。由于交叉概率过大或过小都不利于寻找最优解, 故本文采用一种动态自适应交叉操作, 交叉概率 p_c 通过式(28)计算求得:

$$p_c = 0.8 \times \left(\frac{it_{\max} - it}{it_{\max}} \right) \quad (28)$$

针对染色体中的OS序列、MA序列和WA序列采用不同的交叉方式。

(1) OS序列采用IPOX(improved precedence operation crossover, IPOX)交叉^[26]。将待加工工件分为2个互不重合的非空工件集, 基于IPOX交叉规则选择2条父代染色体进行交叉得到新的子代, 操作过程如图2所示。

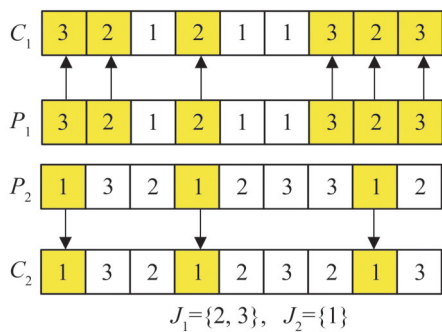


图2 OS序列的IPOX交叉操作
Fig. 2 IPOX crossover operation of OS

(2) WA序列采用多点交叉操作(multi-point preservative crossover, MPX)^[26]。随机生成一组由0和1组成且与WA序列长度相同的数组 S , 交换父代 P_1 和 P_2 中对应 S 位置为1的2个基因, 得到子

代 C_1 和 C_2 , 具体过程如图3所示。

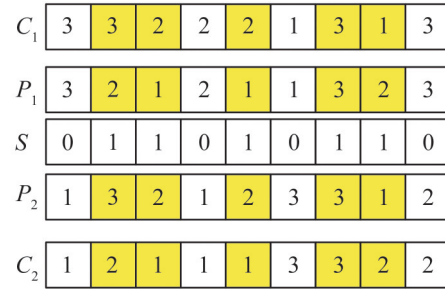


图3 WA序列的MPX交叉操作
Fig. 3 MPX crossover operation of WA

(3) MA序列采用RPX(rand-point preservative crossover)交叉^[24]。随机产生一组 $(0, 1)$ 之间与MA序列长度相等的随机数组 pd , 通过式(29)求得自适应调整概率 pf , 找出 $pd \leq pf$ 的位置, 将父代 P_1 和 P_2 中对应位置的基因互换得到新的子代。 pf_{\max} 和 pf_{\min} 为自适应概率, it 为当前迭代次数, it_{\max} 为总迭代次数, 具体交叉操作如图4所示, $pf = 0.5$ 。

$$pf = pf_{\max} - \frac{pf_{\max} - pf_{\min}}{it_{\max}} \times it \quad (29)$$

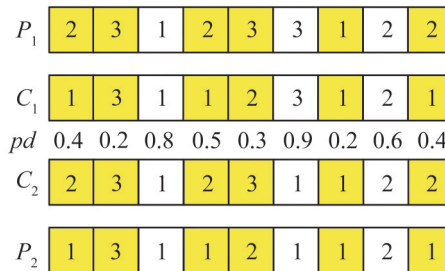


图4 MA序列的RPX交叉操作
Fig. 4 RPX crossover operation of MA

2.6 自适应变异算子

在种群进化过程中, 变异是提高种群多样性的一种有效手段。在种群多样性低时, 通过一个大的变异概率提高种群多样性; 当种群多样性高时, 降低变异概率, 保留优质解。在以往的研究中, 变异概率通常被设为固定值, 因此, 本文采用一种自适应变异操作^[27], 变异概率为

$$p_m = h_1 + h_2 \times \frac{p_s - N_1}{p_s} \quad (30)$$

式中： h_1 和 h_2 为0~1之间的随机数； p_s 为种群规模； N_1 为总非劣等级数。

OS序列采用交换变异，从染色体序列中任意选择2个位置的基因进行交换；WA序列采用基因置换的变异方式，从WA序列中随机选择2个基因位，在该工人对应机器的可选工人集中任选1名工人替换原工人；MA序列的变异操作与WA序列变异过程相似，具体操作过程如图5~7所示。

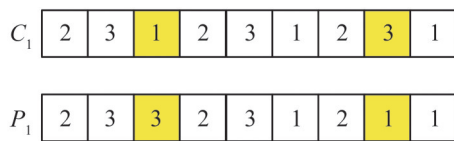


图5 OS序列的交换变异
Fig. 5 Swap mutation of OS

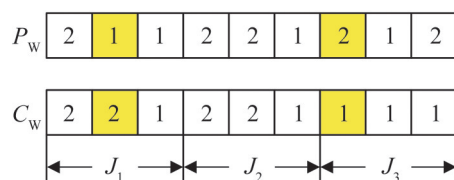


图6 WA序列的替换变异
Fig. 6 Replacement mutation of WA

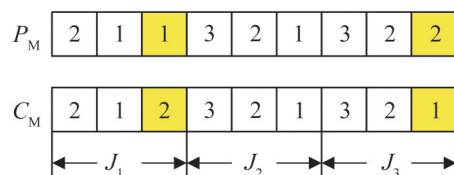


图7 MA序列的替换变异
Fig. 7 Replacement mutation of MA

2.7 INSGA-II 算法流程

综合上述改进策略，本文提出的INSGA-II算法流程如下。

- step 1: 设置算法相关参数；
- step 2: 利用本文所提出的初始化方法生成初始种群；
- step 3: 执行三阶段解码操作，计算个体的目标函数；
- step 4: 对种群进行非支配排序，并利用本文2.4中的方法计算拥挤距离；

step 5: 通过文中设计的进化操作获得新的子代种群，合并新种群和原始种群；

step 6: 对合并后的种群执行 step 3~4 操作，选择进入下一代的个体；

step 7: 若达到终止条件，则输出最佳结果，否则返回 step 5。

3 实验与结果分析

所有算法均由MATLAB R2019b编程软件在配置为Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU @ 2.20 GHz 2.19 GHz，内存为4 GB的Windows10操作系统笔记本电脑上实现。

3.1 算例构造和评价指标分析

为了验证INSGA-II对DRCFJESP-DT的求解效果，将NSGA-II、SPEA2和文献[9]的Jaya作为对比算法，通过不同规模的测试算例进行实验。由于目前还没有DRCFJESP-DT的标准测试算例，本文综合文献[28-29]中的交货期求解方法对文献[30]中的算例进行拓展，得到16组DRCFJESP-DT测试算例(DSP-DT01~DSP-DT16)。通过式(31)计算各算例中工件的交货时间区间：

$$d_i = \left[\left(\sum_{j=1}^{v_i} t_{ij} \right) \times 1.5, \left(5v_i + \sum_{j=1}^{v_i} t_{ij} \right) \times 1.5 \right] \quad (31)$$

式中： t_{ij} 为可用的工人和机器加工 O_{ij} 的时间的平均值。

本文选择反世代距离(IGD)^[31]和集合覆盖率(SC)^[32]这2个被广泛应用的多目标优化算法评价指标作为度量标准，对不同算法得到的解集进行分析，评估INSGA-II优化DRCFJESP-DT的性能。

(1) IGD是评价算法收敛性和分布性的综合指标，具体求解过程如式(32)所示。IGD值越小，非占优解集越接近真实的帕累托边界。

$$IGD(F, F^*) = \frac{1}{|F^*|} \sum_{q \in F^*} \min_{g \in F} d(q, g) \quad (32)$$

式中： F^* 为真实的帕累托前沿； F 为由算法找到的第一帕累托前沿； $d(q, g)$ 为帕累托前沿 F^* 和 F

中2个体之间的最短欧氏距离。

(2) SC 用于判断2个Pareto解集的支配性能, 由式(33)求解得到:

$$SC(A, B) = \frac{|\{x \in B | \exists y \in A: y \succ x\}|}{|B|} \quad (33)$$

式中: A 和 B 为2个不同的算法求得Pareto解的集合; $SC(A, B)$ 为 A 中解支配 B 中解的百分比, 值越大, A 越好, 集合 A 对应的算法越具有优势。

3.2 参数设定

本文选择SPEA2、Jaya和NSGA-II作为对比算法, INSGA-II参数设置为自适应概率 $pf_{\max} = 0.9$, $pf_{\min} = 0.2^{[24]}$, 参数 $h_1 = 0.2$, $h_2 = 0.5^{[27]}$ 。由于本文的优化目标为双目标, 文献[9]的单目标接受准则不再适用, 因此设置进化参数为0.2, 随机产生0-1之间的随机数 r , 若 $r < 0.2$, 染色体序列靠近随机个体, 否则靠近最优个体。4种算法的公共参数设置为提前/拖期惩罚系数 $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.6^{[28]}$, 调度过程中的单位时间公共功率、加工功率和空闲功率分别为 $UCE = 1 \text{ kW}$, $UME = (D \times 5 + 5) \text{ kW}$, $URE = (D \times 4 + 1) \text{ kW}$, 其中 D 表示0-1之间的随机数 $^{[23, 33]}$ 。主要参数如表1所示。

表1 INSGA-II及对比算法的参数设置
Table 1 Parameters setting of INSGA-II and comparison algorithms

参数	INSGA-II	NSGA-II	SPEA2	Jaya
选择算子	锦标赛	锦标赛	锦标赛	锦标赛
交叉概率	$p_c = 0.8 \times (1 - it/it_{\max})$	0.8	0.8	—
变异概率	$p_m = h_1 + h_2 \times (p_s - N_1/p_s)$	0.2	0.2	—

种群规模(n_{pop})和迭代次数(it_{\max})对算法的性能有很大影响。大规模种群可以为算法提供足够的采样点, 但运行时间较长, 小规模种群虽然进化速度快, 但可能得不到可行解; 迭代次数过小会影响算法的有效性, 过大则需要更多的时间。为了使参数设置更加合理, 各算例的 it_{\max} 依据机器和

工人的数量自适应变化, 通过正交实验法确定 it_{\max} 和 n_{pop} 的最佳参数组合。每个参数有4个不同的水平, 通过 $L_{16}(4^2)$ 正交实验表进行测试, 结果如表2~3所示。针对算例DSP-DT05, 将各参数组合在算法下独立运行10次得到的平均IGD值作为评估参数, 结果如表3所示。

表2 参数水平表
Table 2 Parameters level table

参数水平	it_{\max}	n_{pop}
1	$2 \times m \times w$	50
2	$3 \times m \times w$	100
3	$4 \times m \times w$	150
4	$5 \times m \times w$	200

表3 正交表和平均IGD值
Table 3 Orthogonal table and average IGD values

参数组合	it_{\max}	n_{pop}	平均IGD
1	1	1	570.892
2	1	2	943.269
3	1	3	791.291
4	1	4	949.525
5	2	1	645.158
6	2	2	364.970
7	2	3	179.257
8	2	4	536.350
9	3	1	283.331
10	3	2	685.949
11	3	3	779.737
12	3	4	1 201.793
13	4	1	822.474
14	4	2	150.880
15	4	3	630.113
16	4	4	471.710

根据表3中的数据, 通过Minitab 19软件进行实验分析得到参数水平响应表和趋势图, 各参数水平响应值越小越好, 最优结果加粗显示, 结果见表4和图8。由表4和图8可知, it_{\max} 和 n_{pop} 在水平2上的响应值最小, 表明当 it_{\max} 和 n_{pop} 为第2水平时平均IGD值的均值最小。因此, it_{\max} 和 n_{pop} 的最佳参数组合为 $it_{\max} = 3 \times m \times w$, $n_{\text{pop}} = 100$ 。

表4 响应表
Table 4 Response table

水平	it_{max}	n_{pop}
1	813.744	580.464
2	431.434	536.267
3	737.703	595.099
4	518.794	789.844
极差	382.310	253.577
等级	1	2

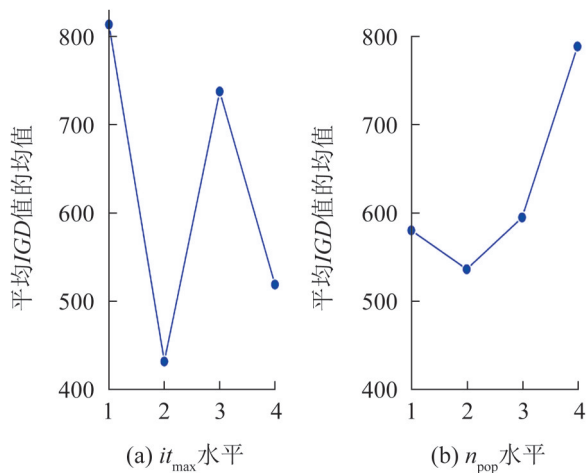


图8 参数水平趋势

Fig. 8 Trend chart of parameters level

3.3 结果分析

本文利用 INSGA-II、SPEA2、Jaya 和 NSGA-II 对 16 组 DRCFJESP-DT 测试算例进行求解，通过 IGD 和 SC 对不同算法得到的解集进行对比分析，评估算法的性能。各组算例在不同算法下独

立运行 10 次后计算平均 IGD 和 SC 值，最优值加粗显示，结果如表 5~6 所示。

由表 5 可知，对于规模不同的 16 组算例，除了算例 DSP-DT01 和 DSP-DT02，本文提出的 INSGA-II 求得平均 IGD 值均小于 NSGA-II、SPEA2 和 Jaya，并且有 2 组算例的 IGD 值为 0，说明相比对比算法，INSGA-II 所得 Pareto 解集距离真实 F^* 更近，在解集的收敛性和分布性上 INSGA-II 更好。根据表 5 绘制如图 9 所示的 IGD 指标箱线图，进一步说明所提算法的优势。从图 9 中可以发现，INSGA-II 的平均 IGD 值的中位数和平均值最小，且二者的结果很接近，同时从四分位差上看，INSGA-II 的平均 IGD 值的四分位差最小，表明 INSGA-II 求得平均 IGD 值波动程度最小，分布比较均匀。由上述分析可知，INSGA-II 对 DRCFJESP-DT 的求解效果优于对比算法。

表 6 为算法间支配关系的平均 SC 值，字母 A、B、C、D 分别表示 INSGA-II、NSGA-II、SPEA2 和 Jaya 获得的 Pareto 解集。表 6 中 $SC(B,A) < SC(A,B)$ 、 $SC(C,A) < SC(A,C)$ 、 $SC(D,A) < SC(A,D)$ ，表明 INSGA-II 求得非支配解支配对比算法解的概率更高，可知 INSGA-II 求得 Pareto 解集更好。同时，有 7 组算例的 SC 值为 1，说明在这 7 组算例中对比算法求得的所有解都受 INSGA-II 求得的解支配，INSGA-II 求解结果明显优于对比算法。

表5 4种算法的平均IGD值
Table 5 Average IGD values of 4 algorithms

算例	INSGA-II	NSGA-II	SPEA2	Jaya	算例	INSGA-II	NSGA-II	SPEA2	Jaya
DSP-DT01	916.326	644.115	1 395.033	1 303.204	DSP-DT09	534.298	5 778.712	5 520.644	6 734.012
DSP-DT02	621.514	502.095	1 538.221	945.809	DSP-DT10	612.453	8 843.959	4 764.178	9 082.816
DSP-DT03	586.896	1 260.381	2 051.342	2 129.274	DSP-DT11	100.955	228.609	394.438	600.947
DSP-DT04	793.655	1 636.360	2 372.599	1 711.077	DSP-DT12	24.040	438.651	297.930	819.338
DSP-DT05	869.020	1 266.660	2 061.577	2 078.353	DSP-DT13	0	4 489.957	3 360.143	6 169.582
DSP-DT06	808.923	1 359.701	1 968.949	2 055.113	DSP-DT14	0	1 070.113	625.553	1 559.655
DSP-DT07	2 747.832	4 560.563	3 457.670	4 886.967	DSP-DT15	524.124	945.546	870.706	1 031.969
DSP-DT08	1 370.674	2 803.459	3 032.543	3 115.835	DSP-DT16	20.152	4 133.212	1 856.580	3 637.362

表6 算法支配关系的平均SC值
Table 6 Average SC values of dominance relationship between algorithms

算例	$SC(A, B)$	$SC(B, A)$	$SC(A, C)$	$SC(C, A)$	$SC(A, D)$	$SC(D, A)$
DSP-DT01	0.798	0.055	0.500	0.215	0.712	0.056
DSP-DT02	1.000	0	0.800	0.101	1.000	0
DSP-DT03	0.900	0.090	0.710	0.129	0.800	0.056
DSP-DT04	1.000	0	1.000	0	1.000	0
DSP-DT05	1.000	0	1.000	0	1.000	0
DSP-DT06	1.000	0	1.000	0	1.000	0
DSP-DT07	0.900	0.100	0.600	0.252	0.700	0.202
DSP-DT08	1.000	0	1.000	0	0.950	0.028
DSP-DT09	0.400	0.333	0.800	0.037	0.652	0.027
DSP-DT10	0.702	0.155	0.704	0.150	1.000	0
DSP-DT11	0.697	0.194	0.570	0.194	0.906	0.048
DSP-DT12	0.700	0.213	0.700	0.046	0.702	0.149
DSP-DT13	0.608	0.238	0.690	0.173	0.999	0.001
DSP-DT14	0.550	0.245	0.500	0.403	1.000	0
DSP-DT15	1.000	0	0.776	0.081	0.844	0.078
DSP-DT16	1.000	0	0.900	0.003	0.948	0.046

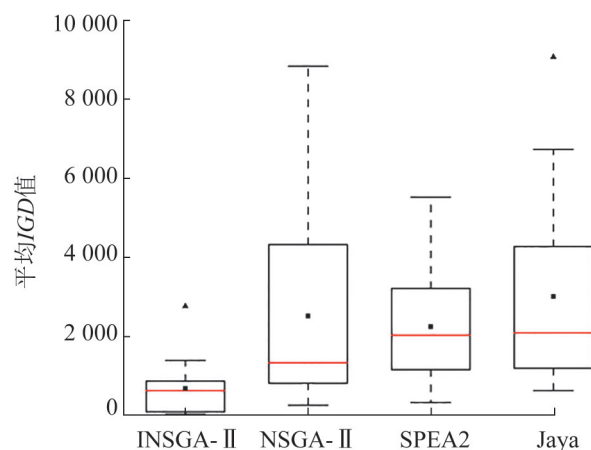


图9 IGD指标箱线图
Fig. 9 Box diagram of IGD indicators

为了更加直观地表示算法间的支配关系及平均SC值的分布状况,依据表6绘制平均SC值箱线图,结果如图10所示。图10中 $SC(A, B)$ 的平均值高于 $SC(B, A)$ 的平均值, $SC(C, A)$ 的平均值高于 $SC(A, C)$ 的平均值, $SC(A, D)$ 的平均值高于 $SC(D, A)$ 的平均值, 并且 $SC(A, B)$ 、 $SC(A, C)$ 和 $SC(A, D)$ 的平均值都在0.75~0.9之间, $SC(B, A)$ 、 $SC(C, A)$ 和 $SC(D, A)$ 的平均值在0~0.15之间,表明在这16组DRCFJESP-DT测试问题中, INSGA-II

获得的Pareto解集支配对比算法解的可能性更高,算法性能更好。综合上述分析可知, INSGA-II可以有效求解DRCFJESP-DT。

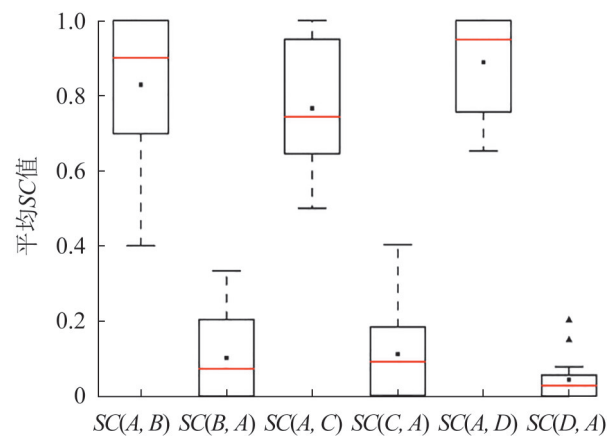


图10 SC指标箱线图
Fig. 10 Box diagram of SC indicators

4 结论

本文在FJSP中同时考虑机器和工人的约束,建立了以总提前和拖期惩罚值及总能耗最小为目标DRCFJESP-DT混合整数线性规划模型,并设计了一种改进的非支配排序遗传算法(INSGA-II)

进行求解。根据所优化的目标设计了一种三阶段解码方法，同时采用有效的自适应交叉和变异方法扩大可行解的搜索范围，提高可行解的质量，通过改进拥挤距离获得分布更加均匀的解。为了验证算法的性能，通过IGD和SC这2个指标对16组调度算例在不同算法下的结果进行对比分析，结果表明，INSGA-II求解DRCFJESP-DT时，在解集的收敛性、多样性和支配性上都具有优势，在降低总提前和拖期惩罚值及总能耗上效果更好。在调度过程中考虑能耗和交货期既符合绿色生产的理念，又有助于企业降低成本，可为企业在激烈的市场竞争中实现绿色可持续发展提供支撑。在后续的研究中，可进一步考虑工人在机器间的移动时间、夹具装卸时间和不同车间类型下的双资源约束问题。

参考文献:

- [1] International Energy Agency: World Energy Outlook 2021 [R/OL]. (2021-10-13) [2021-10-25]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [2] 段建国, 李豪晨, 张青雷. 面向绿色制造的半组合式船用曲轴结构件生产车间多目标调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1714-1727.
Duan Jianguo, Li Haochen, Zhang Qinglei. Green Manufacturing-oriented Multi-objective Scheduling Optimization for Half Built-up Marine Crank Shaft Component Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1714-1727.
- [3] 李聪波, 王睿, 寇阳, 等. 考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 220-230.
Li Congbo, Wang Rui, Kou Yang, et al. An Energy Saving Optimization Method of Flexible Job Shop Scheduling Considering Preventive Maintenance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 220-230.
- [4] 魏鑫, 张泽群, 唐敦兵, 等. 面向节能的导弹结构件混线生产作业车间多目标调度研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 45-54.
Wei Xin, Zhang Zequn, Tang Dunbing, et al. Energy-saving Oriented Multi-objective Shop Floor Scheduling for Mixed-line Production of Missile Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 45-54.
- [5] 陈超, 王艳, 严大虎, 等. 面向能耗的柔性作业车间动态调度研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 2168-2174, 2181.
Chen Chao, Wang Yan, Yan Dahu, et al. Research on Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Problem for Energy Consumption[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2168-2174, 2181.
- [6] Jiang T H, Zhu H Q, Deng G L. Improved African Buffalo Optimization Algorithm for the Green Flexible Job Shop Scheduling Problem Considering Energy Consumption[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems (S1064-1246), 2020, 38(4): 4573-4589.
- [7] 朱光宇, 徐文婕. 考虑能耗与质量的机床构件生产线多目标柔性作业车间调度方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 252-260.
Zhu Guangyu, Xu Wenjie. Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Method for Machine Tool Component Production Line Considering Energy Consumption and Quality[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 252-260.
- [8] Nelson R T. Labor and Machine Limited Production Systems[J]. Management Science(S0025-1909), 1967, 13(9): 648-671.
- [9] 郭鹏, 赵文超, 雷坤. 基于改进Jaya算法的双资源约束柔性作业车间优化调度[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 65: 1-11.
Guo Peng, Zhao Wenchao, Lei Kun. Dual-resource Constrained Flexible Job Shop Optimal Scheduling Based on an Improved Jaya Algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 65: 1-11.
- [10] Renna P, Thurer M, Stevenson M. A Game Theory Model Based on Gale-shapley for Dual-resource Constrained (DRC) Flexible Job Shop Scheduling[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations(S1923-2926), 2020, 11(2): 173-184.
- [11] Zhu H, Deng Q W, Zhang L K, et al. Low Carbon Flexible Job Shop Scheduling Problem Considering Worker Learning Using a Memetic Algorithm[J]. Optimization and Engineering(S1389-4420), 2020, 21(4): 1691-1716.
- [12] Meng L, Zhang C, Zhang B, et al. Mathematical Modeling and Optimization of Energy-conscious Flexible Job Shop Scheduling Problem with Worker Flexibility[J]. IEEE Access(S2169-3536), 2019, 7: 68043-68059.
- [13] Gong G, Deng Q, Gong X, et al. A New Double Flexible Job-shop Scheduling Problem Integrating Processing Time, Green Production, and Human Factor Indicators [J]. Journal of Cleaner Production(S0959-6526), 2018, 174: 560-576.

- [14] Gao K Z, Suganthan P N, Pan Q K, et al. Discrete Harmony Search Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problem with Multiple Objectives[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*(S0956-5515), 2016, 27(2): 363-374.
- [15] Zhang F F, Mei Y, Nguyen S, et al. Surrogate-assisted Evolutionary Multitask Genetic Programming for Dynamic Flexible Job Shop Scheduling[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*(S1089-778X), 2021, 25(4): 651-665.
- [16] Piroozfard H, Wong K Y, Wong W P. Minimizing Total Carbon Footprint and Total Late Work Criterion in Flexible Job Shop Scheduling by Using an Improved Multi-objective Genetic Algorithm[J]. *Resources Conservation and Recycling*(S0921-3449), 2018, 128: 267-283.
- [17] 姜天华, 邓冠龙, 朱惠琦. 离散猫群优化算法求解带交货期的FJSP问题[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 161-168.
Jiang Tianhua, Deng Guanlong, Zhu Huiqi. Discrete Cat Swarm Optimization Algorithm for Solving the FJSP with Due Date[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(1): 161-168.
- [18] 关叶青, 朱颖, 谢乃明. 考虑多成本约束的柔性作业车间制造资源动态分配模型[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 2037-2044.
Guan Yeqing, Zhu Ying, Xie Naiming. Dynamic Allocation Model of Manufacturing Resources in Flexible Job Shop Considering Multi-cost Constraints[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 2037-2044.
- [19] 李兢尧, 黄媛, 王军强. 基于压缩时窗的双资源约束作业车间调度策略[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(12): 2827-2835.
Li Jingyao, Huang Yuan, Wang Junqiang. Scheduling Strategy of Dual Resource Constrained Job Shop Based on Compressed Time Window[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(12): 2827-2835.
- [20] Andrade-Pineda J L, Canca D, Gonzalez-R P L, et al. Scheduling a Dual-resource Flexible Job Shop with Makespan and Due Date-related Criteria[J]. *Annals of Operations Research*(S0254-5330), 2020, 291(1/2): 5-35.
- [21] Zhang G, Gao L, Shi Y. An Effective Genetic Algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. *Expert Systems with Applications*(S0957-4174), 2011, 38(4): 3563-3573.
- [22] 胡成玉, 余果, 颜雪松, 等. 基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 159-165.
Hu Chengyu, Yu Guo, Yan Xuesong, et al. Multi-objective Optimization of Energy and Performance Management in Distributed Data Centers[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 159-165.
- [23] Dai M, Tang D, Giret A, et al. Multi-objective Optimization for Energy-efficient Flexible Job Shop Scheduling Problem with Transportation Constraints[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (S0736-5845), 2019, 59: 143-157.
- [24] Zhang J, Wang W, Xu X. A Hybrid Discrete Particle Swarm Optimization for Dual-resource Constrained Job Shop Scheduling with Resource Flexibility[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*(S0956-5515), 2017, 28(8): 1961-1972.
- [25] Wei F F, Cao C Y, Zhang H P. An Improved Genetic Algorithm for Resource-constrained Flexible Job-shop Scheduling[J]. *International Journal of Simulation Modelling*(S1726-4529), 2021, 20(1): 201-211.
- [26] Wang X J, Gao L, Zhang C Y, et al. A Multi-objective Genetic Algorithm Based on Immune and Entropy Principle for Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*(S0268-3768), 2010, 51(5-8): 757-767.
- [27] 鞠录岩, 杨建军, 张建兵, 等. 改进NSGA算法求解多目标柔性车间作业调度问题[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(13): 260-265, 270.
Ju Luyan, Yang Jianjun, Zhang Jianbing, et al. Improved NSGA for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(13): 260-265, 270.
- [28] 杨宏安, 王周锋, 吕阳阳, 等. 工序加工时间不确定条件下作业车间调度问题的区间数求解方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(9): 2231-2240.
Yang Hongan, Wang Zhoufeng, Lu Yangyang, et al. Interval Number Solving Method for Job-shop Scheduling Problem with Processing Time Variability[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(9): 2231-2240.
- [29] Na H, Park J. Multi-level Job Scheduling in a Flexible Job Shop Environment[J]. *International Journal of Production Research*(S0020-7543), 2014, 52(13): 3877-3887.
- [30] 肖华军. 考虑能效的双资源柔性作业车间调度问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Xiao Huajun. Research on Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Scheduling Problem with Energy-efficient[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [31] Czyzzyk P, Jaszkiwicz A. Pareto Simulated Annealing-A Metaheuristic Technique for Multiple-objective Combinatorial Optimization[J]. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*(S1099-1360), 1998, 7(1): 34-47.

- [32] 肖世昌, 吴自高, 孙树栋, 等. 双资源约束的鲁棒 Job Shop 调度问题研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 227-239.
Xiao Shichang, Wu Zigao, Sun Shudong, et al. Research on the Dual-resource Constrained Robust Job Shop Scheduling Problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(4): 227-239.
- [33] 宋存利. 求解多目标混合流水车间调度的改进 NSGAII 算法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26: 1-19.
Song Cunli. An Improved NSGAII Algorithm for Hybrid Flow Shop Scheduling Problem with Multi-objective[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26: 1-19.