

文章编号: 2095-2163(2022)07-0046-06

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

基于改进 NSGA-II 混合算法求解多目标柔性作业车间调度问题

陆科苗, 何利力

(浙江理工大学 信息学院, 杭州 310018)

摘要: 针对多目标柔性作业车间调度问题(Flexible Job-Shop Scheduling Problem, FJSP), 求解算法和多目标处理至关重要, 在建立以最小化最大完工时间、最小化生产总能耗、最小化设备总负荷为优化目标的数学模型情况下, 提出一种改进的非支配排序遗传算法(INSGA-II)与变邻域搜索算法(VNS)求解该问题。结合问题特点设计工序与设备融合并行双链式编码方式, 将个体基因分成工序和设备两部分分别编码。根据改进的 NSGA-II 算法进行最优解搜索, 将搜索结果作为 VNS 的初始解, 提高初始解的质量。为提高局部搜索能力, 设计 4 种不同的邻域结构, 构建邻域结构集以产生邻域解, 保证邻域解在搜索过程的可行性, 同时提高求解效率。通过在经典数据集上与其它算法进行实验对比, 验证了 IVNSGA-II 算法在多目标生产智能优化调度中的可行性和有效性。

关键词: 非支配排序遗传算法; 柔性作业车间调度; 多目标优化; 变邻域搜索算法

Solving multi-objective flexible job shop scheduling problem based on improved NSGA-II hybrid algorithm

LU Kemiao, HE Lili

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract For the multi-objective flexible job scheduling problem (FJSP), solving algorithm and multi-objective processing are very important. With the goal of establishing the model which minimize the maximum completion time, total production energy consumption, and minimum (total equipment load), an improved non-dominated sorting genetic algorithm (INSGA-II) and variable neighborhood search algorithm (VNS) are propose. Considering the characteristics of the problem and design process and equipment fusion parallel double-stranded coding method, the individual genes are divided into two parts to encode separately. According to the improved NSGA-II algorithm, the optimal solution is searched, and the search result is used as the initial solution of VNS to improve the quality of the initial solution. In order to improve the local search ability, four different neighborhood structures are designed, and a neighborhood structure set is constructed to generate neighborhood solutions, which ensures the feasibility of neighborhood solutions in the search process and improved the solution efficiency. The feasibility and effectiveness of the IVNSGA-II algorithm in multi-objective production intelligent optimization scheduling are verified by experimental comparison with other algorithms on the classical data set.

Key words non-dominated sorting genetic algorithm; flexible job shop scheduling; multi-objective optimization; variable neighborhood search algorithm

0 引言

传统的作业车间调度问题(Job-shop scheduling problem, JSP)一直被大家广泛关注, 柔性作业车间调度问题(Flexible job-shop scheduling problem, FJSP)是此类问题的一种扩展。简而言之, 其是一类满足任务配置需求和条件约束的组合优化问题。求得符合各项要求的最优解, 可用于指导实际生产, 所以对其研究具有重要的实际参考价值^[1-3]。

多年来, 如启发式算法^[4]、禁忌搜索(TS)^[5]、粒子群法(PSO)^[6]、遗传算法(GA)^[7]和变邻域搜

索(VNS)^[8]等算法及混合优化算法^[9-10], 都被广泛用于求解该问题。Amjad^[11]通过研究发现, GA方法是解决FJSP最广泛、有效的算法之一。但经典GA中, 不同的交叉概率和变异概率会极大影响算法行为和性能, 进而影响其算法收敛性^[12]。侍守创等^[13]提出, 将遗传算法与量子粒子群优化算法混合, 改善单一算法收敛性不足的问题。吴秀丽等^[14-15]提出基于NSGA-II算法, 来求解多目标调度问题。张超勇^[16]设计了一种改进的非支配排序遗传算法, 优化了精英选择策略。Sevki^[17]等采用变邻域搜索算法, 设计了两种不同的邻域结构, 组成邻

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C01110)。

作者简介: 陆科苗(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能软件与数据处理; 何利力(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 数据分析、企业智能。

收稿日期: 2022-01-04

域结构集求解 JSP。

从上述研究可以看出,单一算法因其搜索效率低以及进化速度慢,难以进化出较为优质的个体,并存在局部搜索性不足的问题。故采用混合优化算法取长补短求解 FJSP,逐步改良求解过程,最终寻得最优解。当前研究多为 NSGA-II 算法求解多目标优化问题,虽然已经表现了良好的求解能力,但在保持种群的多样性和局部搜索方面仍存在不足。因此,本文结合改进的 NSGA-II 算法全局搜索性能较强和 VNS 算法邻域搜索性能较强的特点,提出一种改进的 NSGA-II 算法和变邻域搜索算法相结合的 IVNSGA-II 算法。通过与其它算法求解 FJSP 的实验结果进行比较分析,验证了算法的有效性和适用性。

1 FJSP 模型

1.1 问题描述

FJSP 可描述为 n 个待加工的工件集合 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ 在 m 台不同的设备集合 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 上加工。每个工件有若干道工序集合,每道工序有若干台设备可以选择,工序的加工时间也因设备的选择而有所不同,且工序间有先后约束,给定各工序加工时间,确定设备所有工件的加工次序和加工时间。柔性作业车间调度问题的符号定义见表 1。

表 1 符号定义

Tab. 1 Symbol definition

序号	符号	定义
1	J	工件集合
2	n	工件总数
3	m	设备总数
4	h_i	工件 i 工序总数
5	i	工件序号索引 $i = 1, 2, \dots, n$
6	j	工序序号索引 $j = 1, 2, \dots, h_i$
7	k	设备序号索引 $k = 1, 2, \dots, m$
8	O_{ij}	工件 i 的第 j 道工序
9	M_k	O_{ij} 的可选设备集合
10	M_{ijk}	O_{ij} 在设备 k 上加工
11	T_{ijk}	O_{ij} 在设备 k 上加工的时间
12	F_i	工件 i 的完工时间
13	S_i	O_{ij} 的开始时间
14	F_{ij}	O_{ij} 的完工时间
15	RT_i	设备 i 的加工时间
16	WT_i	设备 i 的待机时间
17	RP_i	设备 i 加工状态单位能耗
18	WP_i	设备 i 待机状态时单位能耗
19	W_i	设备 i 总生产成本

在 FJSP 的调度过程中,应满足以下约束条件:

- (1) 一道工序只能在一台可选设备上加工;
- (2) 同一工艺路线上的两个工序不能同时加工;
- (3) 同台设备同一时刻只能加工一道工序;
- (4) 加工过程中不能中断;
- (5) 不同工件具有相同的加工优先级;
- (6) 同一工件的工序具有先后约束,不同工件之间没有先后约束。

1.2 多目标优化模型

本文以最大完工时间、生产总能耗、设备总负荷最小,作为 FJSP 的多目标优化函数。其优化模型为:

(1) 最小化最大完工时间:最大完成时间是指所有部件同时进行加工,最后一个部件完成时所花费的时间。时间越短,表明方案越好。计算公式如下:

$$f_1 = \min F_{\max} = \min \{ \max F_i \mid i = 1, 2, \dots, n \} \quad (1)$$

(2) 最小化生产总能耗:在车间实际生产中,计算生产总能耗时需要考虑设备加工和等待加工,两种情况分别对应的单位能耗值是不同的。设备 i 的能耗和车间生产总能耗公式如下:

$$W_i = RT_k * RP_k + WT_k * WP_k \quad (2)$$

$$f_2 = \min W = \min \sum_{k=1}^m W_k \quad (3)$$

(3) 最小化设备总负荷:车间生产加工时,在满足加工能耗与最大完工时间最小的同时,还要考虑到设备的总负荷。因此,工序在能耗相同的情况下,选择加工时间短的设备,使其设备总负荷最小化。计算公式如下:

$$f_3 = \min T = \min \sum_{k=1}^m T_k \quad (4)$$

2 算法设计

2.1 编码

在对 FJSP 进行编码时,需要同时考虑到工序、设备的排序问题。因此,本文采用工序与设备融合并行双链式编码方式。第 1 层为基于工序的编码层 (Operation Sequence, OS),第 2 层为基于设备选择的编码层 (Machine Sequence, MS)。融合两种编码方式,形成一条染色体,就可以得到面向 FJSP 的一个可行解。如图 1 所示,OS 层的数字表示工件号,工件号出现的次数即表示该工件的第几道工序;MS 层则按照工件工序顺序排列并与之相对应,表示相应位置工序的设备选择。OS 层和 MS 层的长度相

等。

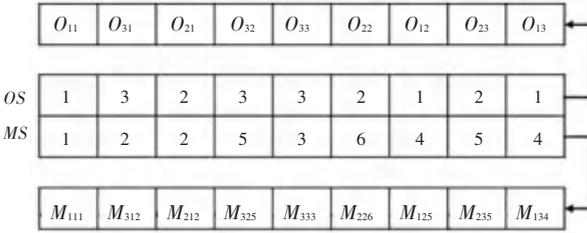


图1 并行双链式编码示例图

Fig. 1 Example of parallel double-chain coding

图1中表示的加工顺序为:工件1的第一道工序在加工设备1上加工→工件3的第一道工序在加工设备2上加工→工件2的第一道工序在加工设备2上加工→工件3的第二道工序在加工设备为5上加工依次类推。这种编码方式保证了后续操作所产生染色体解的可行性,且对工件的工序长度和工件数量无任何要求,避免了后续繁杂的修正操作,简单灵活。此外,对其中一层的单独操作不会影响到另一层,具有很强的并行性。

2.2 解码

对OS和MS层分别进行解码,目标是根据编码层的形式获得空间范围内优质的解。然而在实际任务分配过程中,常常存在两个相邻工序间等待时间过长,所以可将后续符合相应约束条件的工序,提前插入到符合条件的时间区间中,进行“插队”操作。因此,提出一种最优插入法,实现对解的高效搜索。实现步骤如下:

Step 1 判断是否为此工件的首道工序,若是则将0作为空闲起点;反之,将上一道工序的完工时间作为空闲起点;

Step 2 寻找空闲起点之后大于等于待加工工序加工时间的空闲时间段。若未找到,则按顺序正常加工;

Step 3 选择满足待加工工序加工时间且最短的空闲时间段插入;

Step 4 重复 Step1-3,直至所有工序安排完成;

Step 5 计算最大完工时间。

最优插入法的插入过程如图2所示。工序 O_{ij} 将在设备 M_2 上加工,根据当前情况,3段可选空闲时间段均满足 O_{ij} 的加工时间所需条件。其中空闲1结束时间与工序 $O_{i(j-1)}$ 结束时间之差所求的空闲时间小于 O_{ij} 的加工时间,不满足约束条件舍去;空

闲2、3都满足插入条件,而空闲2的空闲时间更短,因此选择空闲2插入。该策略能够为后续工序的插入提供更多的选择,以获取更优质的解。

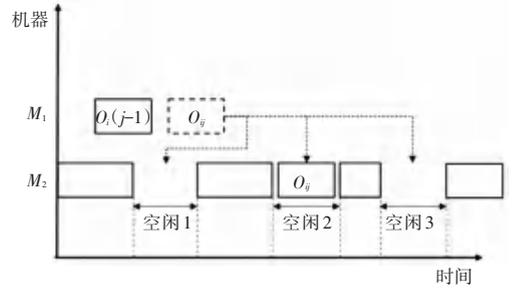


图2 最优插入示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optimal insertion

2.3 种群初始化

NSGA-II算法中,初始化策略影响着解的质量与收敛速度,是重要的起步阶段。考虑到算法复杂度和种群数量大小限制,在种群初始化阶段,数量规模控制在原种群数量的1.5倍。为保证种群多样性,对于OS编码层采用随机选择产生,随机搜索时种群越大找到最优解的概率也就越大;对于MS编码层采用全局选择、局部选择和随机选择的方式初始化。

将随机式初始化和混合式初始化方式相结合,相互取长补短,在保证收敛速度的同时增强全局搜索能力,经过后续处理迭代,提高初始种群丰富度,减少随机性,加大求得最优解的概率。

2.4 选择算子

本文以最大完工时间、生产总能耗、设备总负荷最小作为FJSP问题的目标,对个体的适应度进行评价,算法的适应度如下:

$$f = \frac{1}{\max\{f_1, f_2, f_3\}} \quad (5)$$

其中, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为式(1)、式(3)、式(4)的最小化目标优化函数。需要均衡3个适应度指标,根据计算后的适应度,对个体进行非支配排序,同时计算处于同一支配层级的个体拥挤度^[18]。种群中适应度最大的染色体直接复制到新种群,然后新种群中的其它个体采用动态拥挤度算法并结合精英解保留策略,选择个体组成新父种群。

2.5 交叉操作

(1) OS交叉:采用基于工件顺序的交叉(POX)如图3所示。父代染色体 P_1 与 P_2 进行交叉,交换染色体中工序的位置得到子代 C_1 。

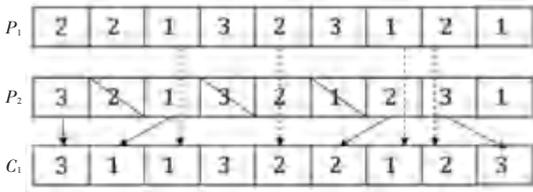


图 3 OS 交叉
Fig. 3 OS cross

(2) MS 交叉: 采用多点交叉如图 4 所示。父代染色体 P_1 和 P_2 分别选择随机位置, 将 P_1 所选位置按顺序插入子代 C_1 , 然后将 P_1 剩余未选中位置插入到子代 C_2 , 同理操作 P_2 。

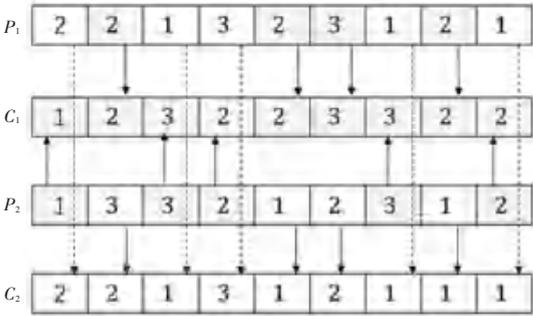


图 4 MS 交叉
Fig. 4 MS cross

2.6 变异操作

变异操作可以起到扩大随机性的作用, 增加算法的搜索能力, 变异操作如图 5 所示。在进化初始阶段, 需要较小的变化概率, 并尽可能多的保留优良基因; 而在后期阶段, 需要适当增加变异概率产生基因的多样性, 以免“早熟”现象, 所以在迭代过程中使用动态自适应变异概率。计算公式如下:

$$P_N = P_0 + \rho \frac{N}{\text{MAX}_{Gen}} \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}} \quad (6)$$

其中, P_0 为初始变异概率值; ρ 为最大变化率; MAX_{Gen} 为最大迭代次数; N 为当前迭代次数。

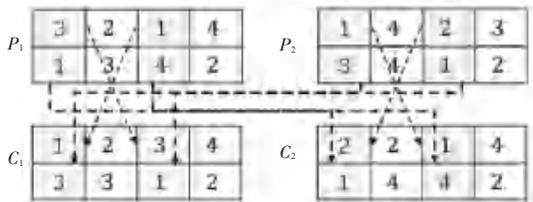


图 5 OS 和 MS 的变异操作
Fig. 5 Mutation operations for OS and MS

2.7 变邻域搜索算法

虽然交叉、变异操作在一定程度上可以增加种群多样性, 但算法仍可能存在陷入局部最优的情况。因此, 引入变邻域搜索算法, 通过改变当前解染色体的某些基因位值, 产生邻域可行解, 从而避免种群进

化过程中产生的解陷入局部最优。本文针对 OS 染色体段, 结合改进的 NSGA-II 算法中各类算子, 再引入 4 种 (insert 算子、inverse 算子、swap 算子、pairwise 算子) 不同的邻域搜索结构, 实现动态邻域搜索, 扩大局部搜索范围, 增强局部搜索能力。

(1) insert 算子: 随机选择 2 点工件所在工序对应的基因位置进行操作。例如位置 2、6, 则把 6 位置的基因插入 2 基因后的位置上, 原来的 3-5 基因往后顺延, 具体的结构变换过程如图 6 所示:



图 6 insert 算子邻域变换示例

Fig. 6 Insert operator neighborhood transformation example

(2) inverse 算子: 随机选择两个位置, 将位置之间的工序基因顺序进行反转。例如, 选择位置 3、7, 具体结构变换过程如图 7 所示:

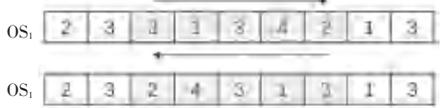


图 7 inverse 算子邻域变换示例

Fig. 7 Inverse operator neighborhood transformation example

(3) swap 算子: 随机取两个位置, 执行两点交换操作。例如, 选择位置 4、6, 具体结构变换过程如图 8 所示:



图 8 swap 算子邻域变换示例

Fig. 8 Swap operator neighborhood transformation example

(4) pairwise 算子: 将相邻的两个成对基因位置互换, 即第一个和第二个基因互换位置, 第三个和第四个基因互换位置, 以此类推, 最后若剩下单个工序则不变动。具体结构变换过程如图 9 所示:



图 9 inverse 算子邻域变换示例

Fig. 9 Inverse operator neighborhood transformation example

2.8 IVNSGA-II 算法

本文提出的 IVNSGA-II 算法, 是以改进的 NSGA-II 算法为基础, 通过非支配排序、动态拥挤度算法和精英选择策略得到新种群, 再结合 VNS 变邻域搜索算法构建邻域结构集求解多目标柔性作业车

间调度问题,算法流程如图10所示。IVNSGA-II算法流程如图10所示:

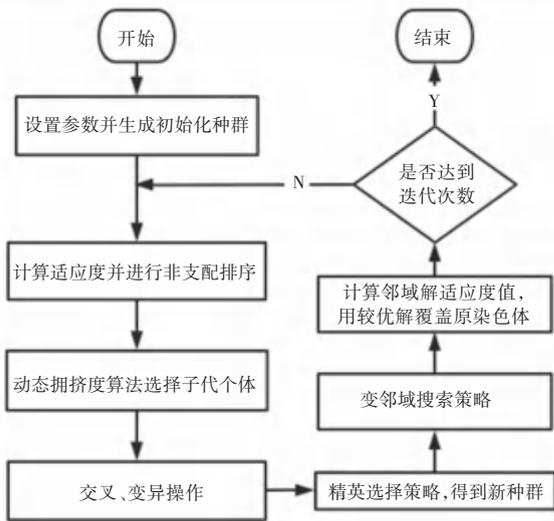


图10 IVNSGA-II算法流程

Fig. 10 IVNSGA-II algorithm flow

3 实验结果与分析

IVNSGA-II算法通过MATLAB编程实现,在

表3 算法运行时间结果对比

Tab. 3 Comparison of running time of different algorithm

数据集	算法运行时间/S				该算法对比提升效果/%		
	GA	PSO	NSGA-II	IVNSGA-II	GA	PSO	NSGA-II
mk01	45	44	43	42	6.7	4.5	2.3
mk02	33	33	32	31	6.1	6.1	3.1
mk03	168	166	159	155	7.7	6.6	2.5
mk04	68	67	66	65	4.4	3.0	1.5
mk05	132	133	129	126	4.5	5.3	2.3

以mk01为例,其收敛曲线如图11所示。由图可见,开始迭代时下降速度较快,说明开始采用的初始策略加速了收敛速度,大概在40代时得到最优解;之后的上下波动,证明IVNSGA-II算法避免了陷入局部最优解。mk01的调度甘特图如图12所示。

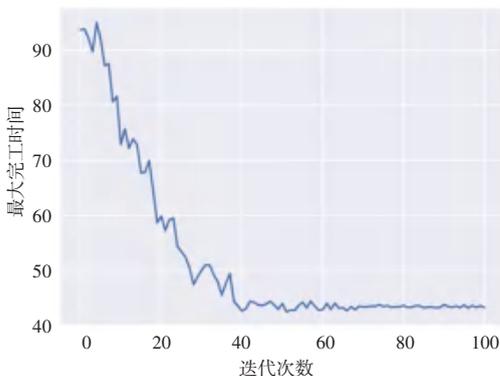


图11 IVNSGA-II迭代收敛图

Fig. 11 IVNSGA-II iterative convergence graph

win10系统, Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80 GHz, 内存8 GB的计算机上实现。各项参数设置为:种群规模 $P_s = 150$, 最大迭代次数 $MAX_{Gen} = 100$, 交叉概率 $P_c = 0.8$, 变异概率 $P_0 = 0.05$ 。

为验证IVNSGA-II算法的可行性和有效性,分别进行单目标优化和三目标优化实验。其中,单目标为最大完工时间。采用Brandimarte^[19]设计的5个典型FJSP数据集(mk01 ~ mk05)进行测试对比,此数据集中包括不同的工件数、工序数、设备数以及加工时间^[20]。车间使用的加工设备功率相关数据见表2。

表2 设备功率表

Tab. 2 Equipment power table

设备	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
加工功率	1.8	1.6	1.8	2.4	4.1	2.4	4.1	3.5	2.8	2.7
待机功率	0.6	0.3	0.5	0.4	0.6	0.4	0.9	0.8	0.4	0.3

3.1 单目标实验

表3为GA、PSO、NSGA-II、IVNSGA-II算法在mk01 ~ mk05中运行的结果。根据对比可以看出,IVNSGA-II均取得最优解,证明了该算法具备良好的性能。

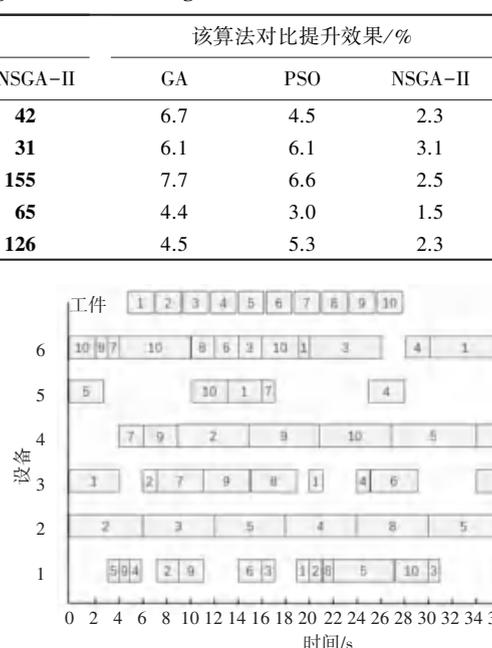


图12 mk01调度甘特图

Fig. 12 mk01 scheduling Gantt chart

3.2 三目标实验

同等条件下在mk01数据集上进行实验,结合设备功率表,针对最大完工时间、生产总能耗以及设备总负荷的三目标求解,得到完整的Pareto前端。不同于单目标的衡量指标,解的数量也是衡量多目

标调度性能的重要指标之一。本文将 IVNSGA-II 与 NSGA-II 进行三目标性能对比,对比结果如图 13 所示。

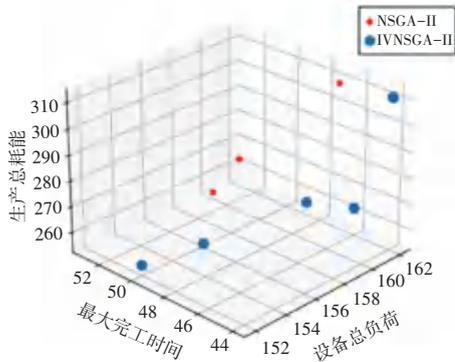


图 13 三目标 Pareto 前沿图

Fig. 13 Three-target Pareto frontier map

从图中可以看出,3 个目标之间相互影响,IVNSGA-II 所获得解的范围更大,解的个数更多,解集质量也更优。可以证明,IVNSGA-II 具有良好的全局收敛性和局部搜索性。在实际调度生产中,企业可以根据实际情况选择合适的解,然后获得相应的甘特图,用于指导实际生产。

4 结束语

本文针对 FJSP 问题,同时考虑多目标优化的特点,以最大完工时间、生产总能耗、设备总负荷最小为优化目标,提出一种 IVNSGA-II 算法,对多目标优化问题求解。通过动态拥挤度和自适应变异算子,保证求解过程中解的多样性;再结合 VNS 算法邻域搜索能力,设计 4 中不同的邻域结构进行变邻域搜索。通过在 Matlab 平台上实例的分析对比,表明该算法可有效解决 FJSP 问题,为车间生产者提供可参考的调度方案,且具有较好的稳定性和寻优能力,验证了所提算法的有效性。

参考文献

[1] GAREY M R, JOHNSON D S, SETHI R. The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling[J]. Mathematics of Operations Research, 1976, 1(2):117-129.
 [2] 薛安全,魏生民,张鹏,等. 基于多种群蚁群算法的柔性作业车间调度研究[J]. 计算机工程与应用,2013,49(24):243-248,261.

[3] 王凌,邓瑾,王圣尧. 分布式车间调度优化算法研究综述[J]. 控制与决策,2016,31(1):1-11.
 [4] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines.[J]. Computing,1990,45(4):369-375
 [5] LIAO Liman, HUANG Chingjen. Tabu search heuristic for two-machine flowshop with batch processing machines[J]. Computers & Industrial Engineering,2010,60(3):426-432.
 [6] GAO L, PENG C Y, ZHOU C, et al. Solving flexible job shop scheduling problem using general particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 36th CIE conference on computers & industrial engineering. 2006: 3018-3027.
 [7] De GIOVANNI L, PEZZELLA F. An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 200(2):395-408.
 [8] HANSEN P, MLADENOVIĆ N, MORENO PEREZ J A. Variable neighbourhood search: methods and applications[J]. Annals of Operations Research, 2010, 175(1):367-407.
 [9] 宋莉波,徐学军,孙延明,等. 一种求解柔性工作车间调度问题的混合遗传算法[J]. 管理科学学报,2010,13(11):6.
 [10] 董蓉,何卫平. 求解 FJSP 的混合遗传-蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(11):2492-2501.
 [11] AMJAD M K, BUTT S I, KOUSAR R, et al. Recent research trends in genetic algorithm based flexible job shop scheduling problems [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018:1-32.
 [12] 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.
 [13] 侍守创,江浩,韩占港,等. 一种面向 FJSP 的混合优化遗传算法[J]. 计算机仿真,2021,38(11):284-289.
 [14] 吴秀丽,崔琪. 基于 NSGA-II 的柔性流水车间低碳调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(11):2792-2807.
 [15] 鞠海华,刘长安,张伟,等. 基于带精英策略的 NSGA-II 遗传算法的车间作业调度研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2008(4):15-19.
 [16] 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.
 [17] Sevkli Mehmet, AYDIN M. Emin. Parallel variable neighbourhood search algorithms for job shop scheduling problems [J]. IMA Journal of Management Mathematics,2007,(2):34-39.
 [18] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州:浙江大学,2006.
 [19] Paolo Brandimarte. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search[J]. Annals of Operations Research,1993,41(3):157-183.
 [20] 徐明,张剑铭,陈松航,等. 柔性作业车间调度问题的多目标优化算法[J]. 计算机与现代化,2021(12):1-6.