

考虑时滞的中药饮片制造过程调度优化<sup>①</sup>何德峰<sup>②</sup> 赵 凯 徐建明<sup>③</sup>

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘 要** 针对中药饮片制造场景下调度求解过程中加工时间不确定以及存在工序间时滞的问题,以最小化最大完工时间为目标,建立考虑时滞的模糊柔性作业车间调度模型,并设计一种改进的遗传算法(IGA)进行求解。使用一种四层编码方法描述带时滞约束的染色体,构建具有模糊加工时间和模糊时滞的作业析取图获取关键路径,使用基于变邻域下降法(VND)的禁忌搜索(TS)增强算法局部搜索能力,再使用一种精英拓展选择策略提高算法迭代效率。以某企业的生产调度数据为例进行仿真实验,结果表明,改进算法在求解中药饮片生产调度问题中具备较好的性能。

**关键词** 中药饮片;生产调度;时滞约束;模糊时间;局部搜索;遗传算法(GA)

中药饮片炮制技术和中药饮片产业是当前中药现代化科技产业的重点领域<sup>[1]</sup>。随着中医药产业工业现代化的进程,该产业在设备制造<sup>[2]</sup>、流程监控<sup>[3]</sup>、质量管理<sup>[4]</sup>等方面已经取得了长足的进展,然而饮片制造过程中各设备间的协同问题却鲜有人研究,中药饮片制造流程中的调度优化成了亟需解决的问题。

生产调度是中药饮片制造过程调度优化的核心问题,通过合理安排工序加工顺序并为每个工序分配机器,可以有效提高生产效率。中药饮片生产调度问题相较于一般柔性作业车间调度问题(flexible job-shop scheduling problem, FJSP)具有动态随机的特点<sup>[5]</sup>,其中原材料清洁程度、尺寸规格的差异会导致加工时间不确定,而工序切换期间清理机器会产生工序间时滞<sup>[6]</sup>,因此其本质上属于考虑时滞的模糊柔性作业车间调度问题(fuzzy flexible job-shop scheduling problem with time lags, ffJSP-TL),此问题与 FJSP 同属于 NP-hard 问题<sup>[7]</sup>。

针对 ffJSP-TL 加工时间不确定的特点,通常采取作业时间模糊化的处理。Behnamian<sup>[8]</sup>使用钟形

模糊数表示不确定加工时间,并提出一种混合粒子群算法求解模糊并行机调度问题。Xu 等人<sup>[9]</sup>提出一种基于教学的优化算法,用于解决具有三角模糊加工时间的柔性作业车间调度问题。Liao 和 Su<sup>[10]</sup>使用一种模糊混合蚁群优化算法,用于求解具有梯形模糊处理时间的并行机调度问题。杨枫等人<sup>[11]</sup>提出一种混合模糊布谷鸟算法,有效解决加工和交货期不确定的中药制药调度问题。ffJSP-TL 具有的时间滞后约束,近年来逐渐受到重视。Defersha 和 Rooyani<sup>[12]</sup>开发一种两阶段遗传算法(genetic algorithm, GA)用于解决考虑序列设置、机器发布日期和滞后时间的综合 FJSP。Harrabi 等人<sup>[13]</sup>设计一种混合生物地理学优化算法(hybrid biogeography-based optimization, HBBO),用于解决具有额外时滞约束的作业车间调度问题。Tamssaouet 等人<sup>[14]</sup>使用模拟退火法来解决最小时间滞后的多目标复杂作业车间调度问题。Li 等人<sup>[15]</sup>提出一种改进的 Jaya(improved Jaya, IJAYA)算法,用于求解具有安装时间滞后的柔性作业车间调度问题。

上述文献分别研究了 ffJSP-TL 的模糊特性和

① 国家自然科学基金面上项目(62173303)和浙江省重点研发计划(2020C03056)资助项目。

② 男,1979年生,博士,教授;研究方向:智能制造优化与控制;E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn。

③ 通信作者,E-mail: xujm@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2023-01-03)

时滞特性,然而对于中药饮片制造场景,要求综合考虑2种特性。本文针对中药饮片生产调度,提出一种针对问题特性的建模方法及求解方法,采用三角模糊方法描述加工时间的不确定性,通过判定工件、工艺类型一致性作为时滞产生条件;在遗传算法框架下,提出一种四层编码方法描述中药饮片制造场景下带时滞约束的染色体个体,采用基于变邻域下降(variable neighborhood descent, VND)的禁忌搜索(tabu search, TS)方法,结合fFJSP-TL的关键路径提高算法局部搜索能力,并提出一种精英拓展选择策略提高算法迭代效率。最后,以某企业的生产调度数据为例进行仿真实验,验证本文模型与算法的有效性。

## 1 中药饮片生产调度问题

### 1.1 问题描述

中药饮片生产调度问题可描述为:存在一个中药饮片生产线,包含前处理机器、炙药机、炒药机、蒸药机、煮药机等类型机器,以中药炮制设备一批次的加工量为最小计划单位;在机器集合 $M$ 里的 $m$ 台机器 $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 上同时生产批次集合 $J$ 中的 $n$ 个批次 $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ ,批次 $J_i$ 加工中药类型集合 $T$ 中的一种中药 $T_i \in T$ ;批次 $J_i$ 包含 $l_i$ 道工序,工序 $O_{i,j}$ 在可选机器集合 $M_{i,j} \subset M$ 中选择机器 $M_k$ ,并采用工艺类型集合 $V$ 中的一种工艺 $V_{i,j} \in V$ 进行加工。由于中药饮片原材料品质参差不齐,各工序的加工时间不确定,因此将批次 $J_i$ 的第 $j$ 道工序 $O_{i,j}$ 在机器 $M_k$ 上的加工时间记为三角模糊数 $\tilde{P}_{i,j,k} = (p_{i,j,k}^1, p_{i,j,k}^2, p_{i,j,k}^3)$ ,并将该工序在机器 $M_k$ 上加工的开始时间和结束时间分别记为 $\tilde{S}_{i,j,k} = (s_{i,j,k}^1, s_{i,j,k}^2, s_{i,j,k}^3)$ 和 $\tilde{C}_{i,j,k} = (c_{i,j,k}^1, c_{i,j,k}^2, c_{i,j,k}^3)$ ,其中三角模糊数的3个变量分别表示此工序最早加工时间、最可能加工时间和最晚加工时间<sup>[16]</sup>。

中药饮片制造流程中设备机器在加工不同配方的中药前需要进行清理,工序 $O_{i,j}$ 的配方由中药类型 $T_i$ 和工艺类型 $V_{i,j}$ 共同决定,当且仅当2个相邻工序的配方相同时,设备机器不会产生清理时滞。

否则,在机器 $M_k$ 上生产时,如果从工序 $O_{i_1, j_1}$ 切换到另一道工序 $O_{i_2, j_2}$ ,且 $T_{i_1} \neq T_{i_2}$ 或者 $V_{i_1, j_1} \neq V_{i_2, j_2}$ ,会在机器 $M_k$ 上产生时长为 $\tilde{\lambda}_{i_1, i_2, k} = (\lambda_{i_1, i_2, k}^1, \lambda_{i_1, i_2, k}^2, \lambda_{i_1, i_2, k}^3)$ 的清理时滞。

本文的目的是寻找合适的调度方案,使最大完工时间最小化。

### 1.2 fFJSP-TL 模型

考虑时滞的模糊柔性作业车间调度问题模型的约束如下。

工序的加工时间为模糊数,且同一批次的工序开始时间必须迟于该批次上个工序结束时间。

$$\tilde{C}_{i,j,k} = \tilde{S}_{i,j,k} + \alpha_{i,j,k} \tilde{P}_{i,j,k} \quad (1)$$

$$\tilde{C}_{i,j,k_1} \leq \tilde{S}_{i,j+1,k_2}, \forall k_1, k_2 = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中决策变量 $\alpha_{i,j,k}$ 表示工序的加工机器选择。

$$\alpha_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{工序 } O_{i,j} \text{ 由机器 } M_k \text{ 加工} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

同一批次的同一道工序只能被一台设备加工。

$$\sum_{k=1}^m \alpha_{i,j,k} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, l_i \quad (4)$$

同一机器上工序开始时间必须迟于该机器上个工序结束时间。对于工序间存在时滞的情况,则要求工序在清理之后开始加工。

$$\begin{cases} \min(\tilde{S}_{i_2, j_2, k} - \tilde{C}_{i_1, j_1, k}) \geq \tilde{\lambda}_{i_1, i_2, k} & u_{i_1, i_2, k} = 1 \\ \min(\tilde{S}_{i_2, j_2, k} - \tilde{C}_{i_1, j_1, k}) \geq 0 & u_{i_1, i_2, k} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中决策变量 $u_{i_1, i_2, k}$ 表示同一台设备上2个相邻工件的时滞约束关系。为了区别时滞的时长与数量单位,本文将此决策变量称为时滞因子,在机器 $M_k$ 上每存在一对时滞约束关系则具有一个数值为1的时滞因子。

$$u_{i_1, i_2, k} = \begin{cases} 1 & (T_{i_1} \neq T_{i_2} \vee V_{i_1, j_1} \neq V_{i_2, j_2}) \wedge \beta_{i_1, j_1, i_2, j_2, k} = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中决策变量 $\beta_{i_1, j_1, i_2, j_2, k}$ 判断工序是否在机器 $M_k$ 上相邻。

$$\beta_{i_1, j_1, i_2, j_2, k} = \begin{cases} 1 & \text{工序 } O_{i_1, j_1} \text{ 为工序 } O_{i_2, j_2} \text{ 的紧前工序} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

考虑时滞的模糊柔性作业车间调度问题模型的目标函数如下。

$$\min F = \max \{f_1(\tilde{C}_{i,j,k}) \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

调度目标为最小化最大加工时间,其中  $f_1$  为 Sakawa 和 Mori<sup>[16]</sup> 提出的三角模糊数大小判定方法第一式。

$$f_1(\tilde{C}_{i,j,k}) = \frac{(c_{i,j,k}^1) + 2(c_{i,j,k}^2) + (c_{i,j,k}^3)}{4} \quad (9)$$

## 2 改进遗传算法

### 2.1 算法求解流程

改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)基于遗传算法框架,在遗传变异操作后加入由禁忌搜索算法和变邻域下降法组成的局部搜索环节,并在局部搜索之后,对搜索结果分别依据最小时间、最小模糊时间跨度和最少时滞因子 3 个指标使用拓展精英的选择操作。改进遗传算法的简化流程如图 1

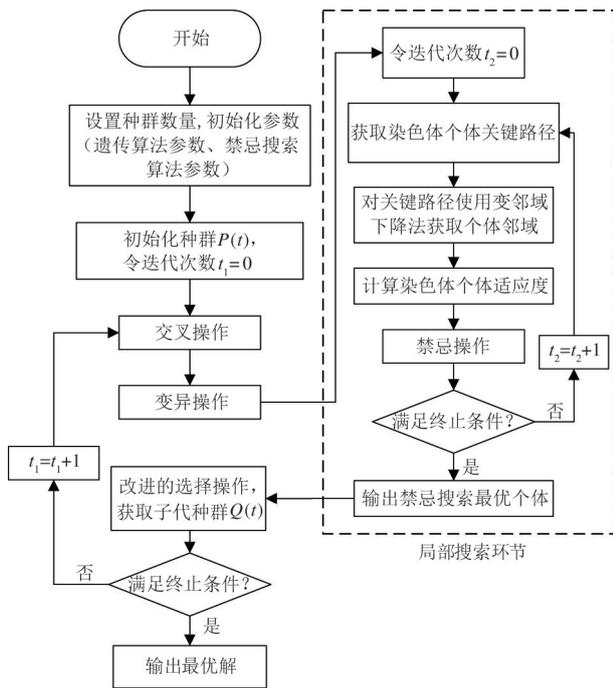


图 1 改进遗传算法流程图

所示,算法使用一种基于遗传算法的四层染色体表示一个作业,首先对初始化后的种群使用交叉和变异操作扩大解空间,接着基于染色体个体构建 fFJSP-TL 模型的作业析取图,从而获取调度方案的关键路径,然后对关键路径进行基于 VND 的禁忌搜索,获取基于适应度的局部最优解。获取的局部最优解将经过改进的选择操作决定是否加入下一代的交叉变异,重复上述过程直至算法迭代结束,输出最优解。

### 2.2 编码与解码

为了考虑加工过程中的时滞约束,本文使用四层编码方式表示种群中的染色体个体,其中染色体工序部分、机器部分、中药类型以及工艺类型均采用二进制编码方法<sup>[17]</sup>,如图 2 所示。

染色体包含 3 个批次  $J_1, J_2, J_3$ , 工序加工顺序为  $O_{2,1}, O_{3,1}, O_{2,2}, O_{1,1}, O_{1,2}, O_{3,2}, O_{2,3}, O_{1,3}, O_{3,3}$ ; 工序对应中药类型为  $T_1, T_2, T_1, T_1, T_1, T_2, T_1, T_1, T_2$ ; 工序对应的加工工艺类型为  $V_1, V_1, V_3, V_1, V_4, V_2, V_4, V_3, V_4$ ; 根据工件顺序分配的机器号为  $M_1, M_2, M_3, M_1, M_3, M_2, M_2, M_1, M_3$ 。

工序号	2	3	2	1	1	3	2	1	3
中药类型	1	2	1	1	1	2	1	1	2
工艺类型	1	1	3	1	4	2	4	3	4
机器号	1	2	3	1	3	2	2	1	3
	$J_1$			$J_2$			$J_3$		

图 2 四层染色体示例

染色体工序部分和机器部分决定作业过程中工序的加工顺序以及加工机器的选择。通过比较同机器上 2 个相邻工序的中药类型与工艺类型,判断是否存在工序间时滞,从而决定是否延后该机器开始加工时间。

根据 fFJSP-TL 模型描述的时间计算方式,结合图 2 所示作业流程和表 1 所示加工时间,可构建作业甘特图如图 3 所示。每条直线表示该机器上的工序加工顺序,直线下方图形表示工序的开始时间,直线上方表示工序的结束时间。

表 1 工序可选机器及其模糊加工时间、模糊时滞示例

工件	工序	M1		M2		M3	
		加工时间	时滞	加工时间	时滞	加工时间	时滞
J1	$O_{1,1}$	(4,5,6)	(4,5,6)	(5,7,9)	(5,6,7)	-	-
	$O_{1,2}$	-	-	(2,3,4)	(3,4,5)	-	-
	$O_{1,3}$	-	-	(4,6,7)	(5,6,7)	(3,4,5)	(2,3,4)
J2	$O_{2,1}$	(2,3,4)	(4,5,6)	-	-	-	-
	$O_{2,2}$	-	-	(3,4,6)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)
	$O_{2,3}$	(3,5,6)	(4,5,6)	(3,4,5)	(3,4,5)	-	-
J3	$O_{3,1}$	-	-	(2,3,5)	(3,4,5)	(5,8,9)	(3,4,5)
	$O_{3,2}$	-	-	(3,4,6)	(3,4,5)	-	-
	$O_{3,3}$	(3,5,7)	(4,5,6)	-	-	(2,3,4)	(4,5,6)

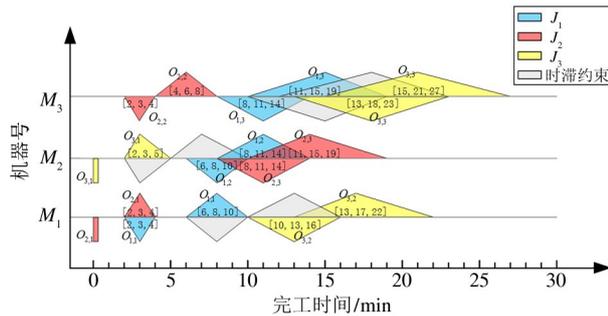


图 3 作业甘特图示例

## 2.3 遗传操作

### 2.3.1 交叉与变异操作

鉴于染色体中药类型与工艺类型部分作用于解码过程,本文仅对工序部分和机器部分进行分段遗传操作。工序部分采用 POX (precedence operation crossover) 交叉<sup>[18]</sup>,并在变异环节根据变异概率随机选择 2 个工序进行交换变异;机器部分采用均匀交叉<sup>[19]</sup>,并在变异环节根据变异概率选择并替换为其他可选机器。

为保证染色体的合法性,根据工件号以及该工件加工的次数,为工序部分中的每个工序绑定中药类型和工艺类型,并在交叉变异结束后再次依据工件号以及该工件加工的次数,为各工序重新设置对应的中药类型和工艺类型。

### 2.3.2 拓展精英的选择操作

在遗传算法中,选择操作从种群中筛选个体作为亲本繁衍后代。结合锦标赛选择法和精英保留策略进行选择可有效保留种群中的优秀个体<sup>[20]</sup>。锦标赛选择法以放回抽样的方式挑选适应度较好的个

体进入子代种群,重复该操作直到种群规模到达原种群规模。精英保留策略避免父代中最优个体在交叉和变异操作中被破坏。

针对 fFJSP-TL 的特性,本文对选择操作中的精英保留策略进行拓展,在保留最小时间精英的基础上额外保留最小模糊时间跨度精英和最少时滞因子精英。拓展精英的选择方式如下。

假设有总数为  $\hat{n}$  的种群  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{\hat{n}}\}$ , 记:

$$g(x) = \max \{f_2(\tilde{C}_{i,j,k})\}, \forall i = 1, 2, \dots, \hat{n} \quad (10)$$

$$G(X) = \min \{g(x_a)\}, \forall a = 1, 2, \dots, \hat{n} \quad (11)$$

$$r(x) = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \sum_{k=1}^m u_{i_1, i_2, k} \quad (12)$$

$$R(x) = \min \{r(x_a)\}, \forall a = 1, 2, \dots, \hat{n} \quad (13)$$

其中,式(10)中  $f_2(\tilde{C}_{i,j,k}) = c_{i,j,k}^3 - c_{i,j,k}^1$  为三角模糊数大小判定方法第三式<sup>[16]</sup>,  $g(x)$  为该个体中的最大模糊时间跨度值,式(11)获取  $G(X)$  对应的  $x_a$  即为最小模糊时间跨度精英。式(12)中  $r(x)$  统计染色体个体中所有机器上的时滞因子数量总和,式(13)获取  $R(x)$  对应  $x_a$  即为最小时滞因子精英。

## 2.4 基于 VND 的禁忌搜索

遗传算法具有并行搜索能力和较好的全局搜索能力,但局部搜索能力存在不足<sup>[21]</sup>。为了加快算法收敛,改进算法将遗传算法的迭代结果作为禁忌搜索初始解,结合变邻域下降法与邻域结构  $NS_i, i \in \{1, 2, 3\}$  进行邻域搜索。基于 VND 的禁忌搜索步

骤如下。

**步骤 1** 从遗传算法的一个解开始迭代,将其作为禁忌搜索的当前最优解,设置迭代次数  $t_2 = 0$ ,设置初始变邻域算子  $i = 1$ 。

**步骤 2** 判断是否满足终止条件,若满足条件则进入步骤 7,否则进入步骤 3。

**步骤 3** 对当前最优解的关键路径使用  $NS_i$  算子进行变邻域操作,然后从邻域解中挑选部分适应度优越解作为候选解集。

**步骤 4** 判断候选解集是否满足特赦准则,如果满足特赦准则,判断候选解集是否全为历史最优解,如果是则解禁历史次优解,否则解禁历史最优解。如果候选解集不满足特赦准则,选出非禁忌解中的最优适应度解作为当前最优解,并将其加入禁忌表。

**步骤 5** 根据禁忌结果判断邻域解是否改进,若改进则令  $i = i + 1$ ,否则令  $i = 1$ 。

**步骤 6** 更新禁忌表,令  $t_2 = t_2 + 1$ ,返回步骤 2。

**步骤 7** 输出最优解。

### 2.4.1 邻域结构

本文采用 3 种邻域结构用于获取禁忌搜索的候选解,包含  $NS^{[22]}$  和  $N6^{[23]}$  2 种第 1 类邻域结构,以及 1 种第 2 类邻域结构<sup>[24]</sup>,根据邻域空间由小到大分别将这 3 种邻域结构记为  $NS_1$ 、 $NS_2$ 、 $NS_3$ 。 $NS_1$ : 交换关键块上头尾工序与其相邻工序,第 1 个关键块只交换后 2 个工序,最后 1 个关键块只交换前 2 个工序。 $NS_2$ : 将关键块的最后 1 个工序的加工机器替换为其他机器。 $NS_3$ : 将关键块内部工序向块首之前或块尾之后移动。

### 2.4.2 关键路径求解

关键路径的求解基于析取图模型,本文在 FJSP 析取图模型<sup>[24]</sup>基础上针对 fFJSP-TL 的特性进行改进。根据图 3 甘特图可构建如图 4 所示的作业析取图,析取图使用节点  $\tilde{V}_{i,j}$  表示工序  $O_{i,j}$ ,节点的权重为此工序的模糊加工时间  $\tilde{P}_{i,j,k}$ ;实线弧反映同工件工序加工顺序;虚线弧反映同机器工序加工顺序,其权重由紧前节点的时滞因子决定:对于一条连接节点  $\tilde{V}_{i_1,j_1}$  和  $\tilde{V}_{i_2,j_2}$  虚线弧,当  $u_{i_1,i_2,k} = 1$  时,权重为

$\tilde{\lambda}_{i_1,i_2,k}$ , 否则为 0。

关键路径为析取图中由初始节点 0 到终止节点 # 的最长路径,根据节点的加工设备,可将关键路径划分为多个关键块,同一设备上相邻的关键节点组合视作关键块。对关键块进行变邻域操作可以保证邻域解的可行性和变邻域操作的有效性<sup>[25]</sup>。为了避免多关键路径情况,本文采用仅对共用关键块进行变邻域操作的策略<sup>[26]</sup>。由于图 4 所示作业较为简易,唯一关键路径已在图中标出。

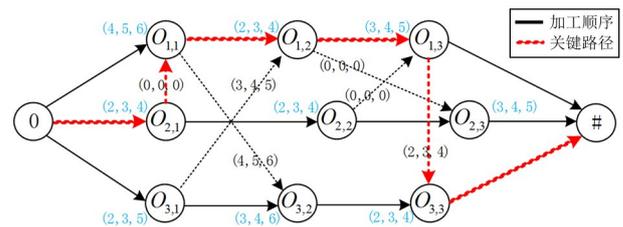


图 4 作业析取图示例

## 3 实验设计与分析

### 3.1 实验设计

为了验证改进遗传算法的有效性,本文对算法进行优化对比实验,分别验证基于 VND 的禁忌搜索策略和精英拓展选择策略的有效性。同时还与其他启发式算法进行对比实验,包括 GA<sup>[27]</sup>、TS<sup>[28]</sup>、HBBO<sup>[13]</sup> 和 IJAYA 算法<sup>[15]</sup>。

基于中药饮片生产过程数据,本文设计 15 个测试数据集并划分成小型、中型、大型 3 类生产规模记为  $\{D1, D2, D3\}$ ,各生产规模间的差异如表 2 所示。每个规模下包含 5 个数据集,各数据集依照生产规模参数从前处理机、蒸药机、煮药机、炒药机、炙药机中选取机器种类,从黄精、熟地、何首乌、地黄、甘草、远志中选取工件种类,从前处理、清蒸、酒蒸、

表 2 数据集规模

规模	工件数	各工件数	机器种类数	同种类机器数	工件种类数	工艺种类数
D1	20	2	3	3	3	6
D2	50	3	4	4	4	6
D3	100	3	4	5	4	6

水煮、蜜炙、酒炙、清炒、麸炒中选取工艺方法。所有数据集表示的作业均属于部分 fFJSP-TL。

在  $D1\_1$  数据集表示的作业中,有 20 个批次原材料包含 6 批甘草、6 批黄精以及 8 批远志,在中药前处理机  $M1 \sim M3$ 、炒药机  $M4 \sim M6$ 、蒸药机  $M7$

$\sim M9$  以不同加工顺序进行加工,每个批次需要进行 2 个步骤的加工。图 5 为基于  $D1\_1$  数据集进行调度优化后的作业甘特图,图中清理时滞隐式地延迟工序时间。调度结果根据式 (9) 可计算此次作业最大完工时间的最小值为 157.25 min。

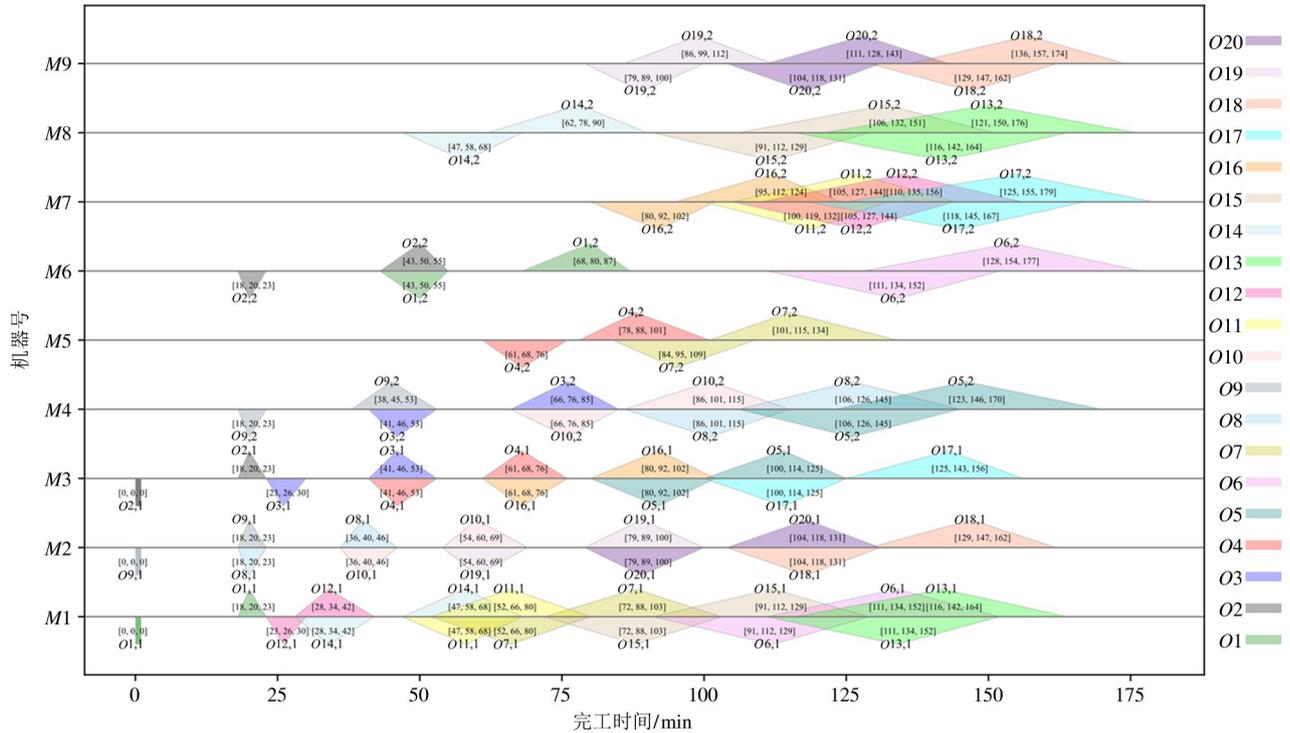


图 5  $D1\_1$  作业甘特图

### 3.2 优化对比实验

为了验证优化策略的有效性,本文采用控制变量的方法将改进遗传算法与使用变邻域搜索(variable neighborhood search, VNS)的改进遗传算法以及使用原始精英选择策略的改进遗传算法进行对比。对  $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$  这 3 类规模的共 15 个数据集,分别进行独立 30 次计算,比较指标包含最大完工时间最小值(Min)、最大完工时间最小值均值(Avg)以及最大完工时间最小值均值标准差(Std)。根据表 3 实验结果可知,改进遗传算法中采用的 2 种改进策略在求解 fFJSP-TL 上表现更好。

### 3.3 算法对比实验

为了进一步验证改进遗传算法对求解 fFJSP-TL 问题的优越性,本文选择 GA、TS、HBBO、IJAYA 算法进行对比。每种对比算法都在 3 种规模的共 15 个数据集上独立运行 30 次,对比指标同上。本文中

所有算法的最大迭代次数为 20,种群大小为 50。实验结果如表 4 所示。

为了对比算法间的性能差异,本文将各算法在同数据集下计算的最大完工时间最小值  $\hat{C}_{\max}^{\min}$  与全局完工时间最小值  $\min(C_{\max}^{\min})$  的百分比提升值记为  $MRE(\text{Min})$ :

$$MRE(\text{Min}) = \frac{\hat{C}_{\max}^{\min} - \min(C_{\max}^{\min})}{\min(C_{\max}^{\min})} \quad (14)$$

其中,  $\hat{C}_{\max}^{\min}$  为该算法在当前数据集针对目标函数  $\min F$  优化求得的解,  $\min(C_{\max}^{\min})$  为所有算法在当前数据集针对目标函数  $\min F$  优化求得解的最小值。

同理将最大完工时间最小值均值的百分比提升值记为  $MRE(\text{Avg})$ , 最大完工时间最小值标准差的百分比改进值记为  $MRE(\text{Std})$ :

$$MRE(\text{Avg}) = \frac{\hat{C}_{\max}^{\text{avg}} - \min(C_{\max}^{\text{avg}})}{\min(C_{\max}^{\text{avg}})} \quad (15)$$

表 3 改进遗传算法针对 fFJSP-TL 问题优化策略有效性对比实验结果/min

数据集	IGA			使用 VNS			使用初始精英选择策略		
	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std
D1_1	157.25	166.09	3.32	162.25	169.60	4.54	166.50	176.69	5.23
D1_2	175.25	181.26	4.19	178.75	183.58	4.98	185.00	194.32	6.81
D1_3	163.75	171.15	4.46	169.00	173.76	4.72	174.25	184.91	5.67
D1_4	150.50	159.43	3.61	155.25	161.14	4.35	161.25	172.12	5.06
D1_5	208.00	216.68	5.69	214.75	220.55	6.01	220.25	233.73	6.82
D2_1	449.50	468.04	8.43	468.75	480.80	17.79	466.00	514.86	24.98
D2_2	416.75	445.53	8.27	434.75	445.92	16.50	438.25	482.76	24.10
D2_3	386.75	412.85	7.86	403.50	413.87	16.31	412.25	432.01	22.86
D2_4	440.00	468.37	10.92	461.00	472.85	16.49	467.75	503.83	24.66
D2_5	513.50	538.91	11.33	535.75	549.22	20.72	548.00	589.19	18.05
D3_1	745.75	768.19	18.38	791.75	812.97	33.84	821.25	874.53	37.34
D3_2	835.25	871.02	21.50	874.50	897.94	38.48	898.25	967.24	41.30
D3_3	789.75	823.93	17.72	824.25	845.34	36.27	852.50	907.37	38.74
D3_4	868.50	901.20	22.94	896.25	919.27	40.44	937.75	1000.18	42.71
D3_5	937.25	959.36	29.29	973.50	1000.58	41.83	998.00	1072.69	46.83

表 4 5 个算法指标对比结果/min

数据集	IGA			GA			TS			HBBO			IJAYA		
	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std	Min	Avg	Std
D1_1	157.25	166.09	3.32	165.25	187.34	5.18	160.00	175.28	4.65	157.75	168.80	3.90	164.75	182.31	4.59
D1_2	175.25	188.26	4.19	184.00	210.29	6.12	179.75	189.49	4.23	179.25	192.36	4.08	183.50	202.39	4.80
D1_3	163.75	175.15	4.46	173.00	196.51	6.92	164.75	178.26	5.27	167.00	176.78	4.95	170.75	184.39	5.52
D1_4	150.50	159.53	3.61	163.75	180.55	5.78	157.25	169.14	3.31	152.50	162.82	4.05	158.75	177.85	3.71
D1_5	208.00	216.68	5.69	225.50	250.36	9.46	216.75	236.52	5.91	212.00	225.47	5.99	213.00	243.46	6.79
D2_1	449.50	468.04	8.43	489.50	523.42	14.68	452.50	483.44	9.08	457.50	474.67	9.20	458.75	483.43	7.95
D2_2	416.75	445.53	8.27	453.25	492.39	12.46	429.50	454.71	8.97	427.00	451.11	10.09	430.00	463.56	9.29
D2_3	386.75	412.85	7.86	422.75	464.66	13.42	401.25	423.15	9.84	392.00	416.95	10.37	396.25	435.91	10.23
D2_4	440.00	468.37	10.92	472.00	515.51	17.33	454.75	479.04	11.32	442.25	483.33	11.47	452.50	493.28	13.41
D2_5	513.50	538.91	11.33	557.25	592.30	16.21	536.50	557.49	10.20	529.25	549.86	12.34	527.25	574.90	13.56
D3_1	745.75	768.19	18.38	789.25	842.68	27.39	755.50	778.20	20.01	744.50	775.38	19.28	749.50	805.44	22.80
D3_2	835.25	871.02	21.50	896.50	948.60	33.82	843.25	881.07	21.32	844.50	870.87	22.11	838.50	912.83	26.19
D3_3	789.75	823.93	16.72	846.50	895.94	24.61	802.25	845.03	19.34	801.50	839.39	20.31	805.75	842.49	15.49
D3_4	868.50	901.20	20.94	921.00	979.35	30.52	881.00	912.24	19.04	872.25	924.50	26.29	865.25	914.69	20.33
D3_5	937.25	968.36	27.29	997.50	1053.86	39.24	952.75	982.31	27.53	938.75	976.33	32.95	943.75	965.09	25.03

$$MRE(Std) = \frac{\hat{C}_{max}^{std} - \min(C_{max}^{std})}{\min(C_{max}^{std})} \quad (16)$$

图 6~8 为各算法在 15 个数据集下的计算结果分别对应 Min、Avg、Std 指标的 MRE 对比图。根据对比结果可知,多数情况下改进遗传算法相较于其他算法,获取的完工时间最小值最佳且完工时间最小值均值更优,表示对于求解考虑模糊特性和时滞

特性的中药饮片生产调度问题,使用该算法获取的最优调度方案可以最早完成所有批次的生产,并且更容易获取加工时间更短的方案。

然而改进遗传算法计算的适应度在个别数据集上结果相较于其他算法较分散,且随着数据集规模增大,改进遗传算法在 Min、Avg 指标上的优势逐渐减小。这是因为使用遗传算法会在调度过程进行全

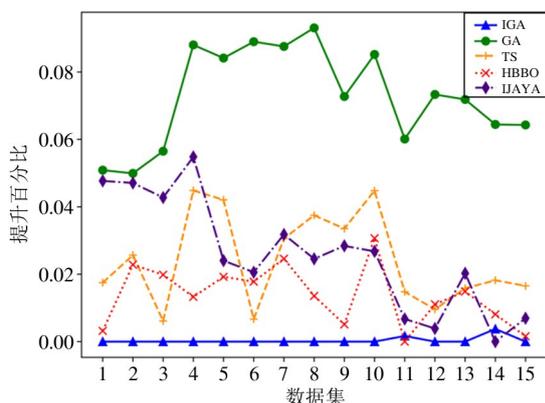


图6 5种算法 Min 指标对比图

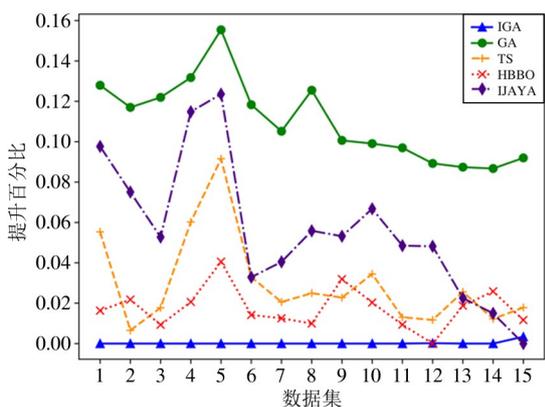


图7 5种算法 Avg 指标对比图

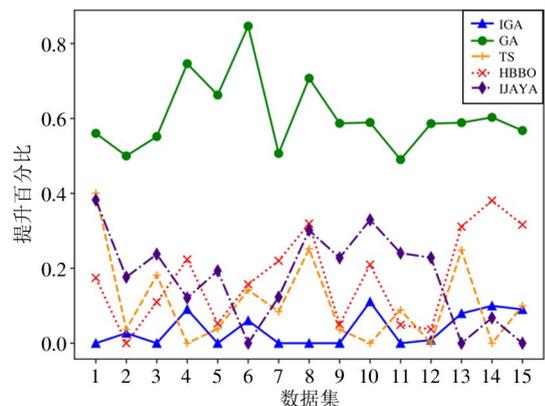


图8 5种算法 Std 指标对比图

局随机搜索,这在扩大搜索空间范围的同时也会使最终解分布更加分散。改进遗传算法在 Min、Avg 指标上性能的下落可解释为随着调度规模的增大,中药原材料的品质差异扩大致使加工时间的区间扩大,而更多批次类型的同时调度使时滞产生过程表现出更大的随机性。虽然本文采用了拓展精英的选择操作使部分解进行指向迭代,但仍无法避免解空

间范围进一步扩大,这要求更多的迭代次数和计算时间来获取最优调度方案。

## 4 结论

本文针对中药饮片制造场景下的调度问题,考虑工序加工时间不确定以及存在工序间清理时滞的特性,对遗传算法进行改进并用于求解该调度问题。改进遗传算法通过对关键路径进行变邻域下降禁忌搜索提高算法局部搜索效率,使用精英拓展的选择策略提高算法迭代效率。为了验证算法性能,本文基于生产调度数据设计了3类不同规模的数据集并进行计算实验。实验结果表明,对于中药饮片生产调度问题,本文提出的改进遗传算法在中小规模问题上相较其他启发式算法有更好的性能。

在未来的工作中,将考虑优化该问题的多目标场景,如机器负载、能源损耗等。另外,还将优化该算法对于大规模问题调度性能。

## 参考文献

- [1] 桑滨生.《中医药发展战略规划纲要(2016-2030年)》解读[J].世界科学技术-中医药现代化,2016,18(7):1088-1092.
- [2] 于洋,苗坤宏,李正.基于数字孪生的中药智能制造关键技术[J].中国中药杂志,2021,46(9):2350-2355.
- [3] 李越,熊皓舒,鞠伟,等.中药智能制造实时数据库开发、计算机化系统验证及应用[J].中国医药工业杂志,2021,52(10):1396-1407.
- [4] 熊皓舒,田埂,刘朋,等.中药生产过程质量控制关键技术研究进展[J].中草药,2020,51(16):4331-4337.
- [5] 张艳梅.中药制药生产调度系统研究及其应用[D].昆明:昆明理工大学,2009:7-8.
- [6] TOSCANO A, FERREIRA D, MORABITO R. A decomposition heuristic to solve the two-stage lot sizing and scheduling problem with temporal cleaning[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2019, 31(1): 142-173.
- [7] PAVLOV A A, MISURA E B, MELNIKOV O V, et al. NP-hard scheduling problems in planning process automa-

- tion in discrete systems of certain classes [C] // International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications. Kiev, Ukraine: CSSE, 2018: 429-436.
- [ 8 ] BEHNAMIAN J. Particle swarm optimization-based algorithm for fuzzy parallel machine scheduling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5): 883-895.
- [ 9 ] XU Y, WANG L, WANG S, et al. An effective teaching-learning-based optimization algorithm for the flexible job-shop scheduling problem with fuzzy processing time [J]. Neurocomputing, 2015, 148: 260-268.
- [ 10 ] LIAO T W, SU P. Parallel machine scheduling in fuzzy environment with hybrid ant colony optimization including a comparison of fuzzy number ranking methods in consideration of spread of fuzziness [J]. Applied Soft Computing, 2017, 56: 65-81.
- [ 11 ] 杨枫, 叶春明, 施明华. 基于模糊软集的中药制药车间不确定调度模型和算法求解 [J]. 系统管理学报, 2020, 29(1): 119-128.
- [ 12 ] DEFERSHA F M, ROOYANI D. An efficient two-stage genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent attached/detached setup, machine release date and lag-time [J]. Computers and Industrial Engineering, 2020, 147: 1-19.
- [ 13 ] HARRABI M, DRISS O B, GHEDIRA K. A modified biogeography-based optimization algorithm with improved mutation operator for job shop scheduling problem with time lags [J]. Logic Journal of the IGPL, 2021, 29(6): 951-962.
- [ 14 ] TAMSSAOUET K, DAUZÈRE-PÉRÈS S, KNOPP S, et al. Multiobjective optimization for complex flexible job-shop scheduling problems [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 296(1): 87-100.
- [ 15 ] LI J, DENG J, LI C, et al. An improved Jaya algorithm for solving the flexible job shop scheduling problem with transportation and setup times [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 200: 106032.
- [ 16 ] SAKAWA M, MORI T. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date [J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 36(2): 325-341.
- [ 17 ] GEN M, TSUJIMURA Y, KUBOTA E. Solving job-shop scheduling problems by genetic algorithm [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio, USA: IEEE, 1994: 1577-1582.
- [ 18 ] 张超勇, 饶运清, 李培根, 等. 求解作业车间调度问题的一种改进遗传算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(8): 966-970.
- [ 19 ] ZHANG G, GAO L, SHI Y. An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3563-3573.
- [ 20 ] WANG Y, ZHU Q. A hybrid genetic algorithm for flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times and job lag times [J]. IEEE Access, 2021, 9: 104864-104873.
- [ 21 ] MOSCATO P, NORMAN M G. A memetic approach for the traveling salesman problem implementation of a computational ecology for combinatorial optimization on message-passing systems [J]. Parallel Computing and Transputer Applications, 1992, 1: 177-186.
- [ 22 ] NOWICKI E, SMUTNICKI C. A fast taboo search algorithm for the job shop problem [J]. Management Science, 1996, 42(6): 797-813.
- [ 23 ] BALAS E, VAZACOPOULOS A. Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling [J]. Management Science, 1998, 44(2): 262-275.
- [ 24 ] 黄学文, 陈绍芬, 周闾玉, 等. 求解柔性作业车间调度问题的一种新邻域结构 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(9): 2367-2378.
- [ 25 ] DELL'AMICO M, TRUBIAN M. Applying tabu search to the job-shop scheduling problem [J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(3): 231-252.
- [ 26 ] FAN J, SHEN W, GAO L, et al. A hybrid Jaya algorithm for solving flexible job shop scheduling problem considering multiple critical paths [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60: 298-311.
- [ 27 ] GUIMARAES K F, FERNANDES M A. An approach for flexible job-shop scheduling with separable sequence-dependent setup time [C] // 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Taipei, China: IEEE, 2006: 3727-3731.
- [ 28 ] SHEN L, DAUZÈRE-PÉRÈS S, NEUFELD J S. Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-

dependent setup times [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(2):503-516.

## Scheduling optimization of herbal decoction pieces manufacturing process with time lags

HE Defeng, ZHAO Kai, XU Jianming

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

### Abstract

Uncertain processing time and existence of time lags between processes are main problems in scheduling of herbal decoction pieces production. To solve these problems, aiming at minimizing makespan, a fuzzy flexible job-shop scheduling model with time lags is established, and an improved genetic algorithm (IGA) is designed. The algorithm uses a four-layer coding method to describe the chromosomes with time lags. The critical path is obtained by constructing a job disjunctive graph with fuzzy processing time and fuzzy time lags. The tabu search (TS) based on variable neighborhood descent (VND) is used to enhance the local search capability, and an elite expanded selection strategy is used to improve the iterative efficiency. Simulation experiments based on the production scheduling data in a plant are carried out, and the results show that the improved algorithm has good performance in scheduling of herbal decoction pieces manufacture.

**Key words:** herbal decoction piece, production scheduling, time lag, fuzzy time, local search, genetic algorithm (GA)