

考虑订单约束的分布式混合流水车间调度

徐斌¹ 毕家乐¹ 洪德奔¹

XU Bin BI Jiale HONG Deben

摘要

针对分布式异构混合流水车间调度中存在序列相关准备时间的问题,为有效降低管理与运输成本,引入订单约束条件:同一客户订单下的工件仅能分配至单一车间,且需按工件种类进行批量加工。基于此,构建以最小化最大完工时间和总加权拖期目标的混合整数规划模型,并提出一种改进的人工蜂群算法用于求解该模型。与此同时,为提高种群质量,根据问题特性设计了一种启发式的初始化方法,并基于关键车间和关键订单设计了7个邻域实现有效收敛,在雇佣蜂和观察蜂阶段分别引入了精英选择策略和二元锦标赛选择策略以提高 Pareto 前沿的质量。最后通过多组算例的实验,验证了算法对该问题的有效性。

关键词

分布式调度;混合流水车间调度;人工蜂群算法;多目标优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.045

0 引言

混合流水车间调度问题(hybrid flow-shop scheduling problem, HFSP)也称柔性流水车间调度问题,其在传统的流水车间调度基础上增加了并行机调度,可有效减小瓶颈设备的影响,广泛应用于半导体^[1]、机械加工^[2]、冶炼^[3]等行业。

随着经济全球化的深入和客户个性化需求的日益复杂,分布式的多工厂协同制造凭借低成本、高效率的优点已成大势所趋。分布式调度主要包括分布式并行机调度^[4]、分布式作业车间调度^[5]、分布式流水车间调度^[6]等。分布式混合流水车间调度问题(distributed hybrid flow-shop scheduling problem, DHFSP)属于分布式流水车间问题的一种,强调了混合流水的高效性和分布式制造的协同性,诸多学者对 DHFSP 展开了研究。例如, Tao 等人^[7]对分布式资源受限的 DHFSP,设计出一种改进人工蜂群算法。Cai^[8]提出一种协同混合蛙跳算法(CSFLA)求解考虑模糊因素的 DHFSP。此外, Lei^[9]和 Wang^[10]分别对 DHFSP 进行了算法设计与求解。

以上研究都假设车间生产状况相同,缺乏对实际车间的异构性考虑,如分布式的各个车间会由于建造时间、投资成本等因素不同而导致机器和布局的差异。因此,有学者开始对分布式异构混合流水车间(distributed heterogeneous hybrid flow-shop scheduling problem, DHHFSP)展开研究。对于单

目标 DHHFSP, Cui 等人^[11]设计了一种贪婪选择工件插入厂间邻域结构的多群体遗传算法(IMPGA)优化最大完工时间。同时, Shao 等人^[12]研究了带批次流的 DHHFSP。Li 等人^[13]则研究考虑不相关并行机(UPM)和序列相关准备时间(SDST)的 DHHFSP。Liu 等人^[14]以铝材生产的 DHHFSP 为例,考虑了工件在特定阶段机器上加工时间的恶化效应。对于多目标 DHHFSP, Shao 等人^[15]考虑电价的区域和时间差异,以完工时间和总电费为优化目标建立不同分时电价下的 DHHFSP 模型,并提出一种基于分解的蚁群优化行为多目标进化算法进行求解。Zheng 等人^[16]对于 DHHFSP 首次考虑工件的检验和再加工的动态调度问题,提出一种改进模因算法来最小化最大完工时间和总能耗。

上述内容对机器间的转运时间研究不多,且未研究分布式场景中可能会存在的订单约束^[17]。所以本文针对考虑 SDST 的 DHHFSP,考虑工件工序间的转运时间,并考虑一种单个订单内所有工件必须分配到同一车间并按批量加工的订单约束。人工蜂群算法已广泛用于车间调度问题^[18],对该问题提出一种改进的人工蜂群算法来优化最大完工时间和总加权拖期。

1 问题描述及模型

1.1 DHHFSP 问题描述

本文研究的 DHHFSP 如图 1 所示,某公司拥有 f 个不同位置的混合流水车间,每个车间都独立且具有相同工序数,车间的并行机为不相关并行机,具体表现在同工序机器数量、加工速度差异。某一刻该公司需要处理 o 个客户订单,共包

1. 安徽工业大学管理科学与工程学院 安徽马鞍山 243000
[基金项目] 安徽省高校自然科学研究重点项目(2022AH050324);安徽普通高校重点实验室开放基金项目(CS2023-04)

含 a 种工件，每种工件工艺相同且能在任意车间加工。每位客户订单包含 a 种工件中若干种，每种工件若干数量。单个订单的所有工件只能分配到一个车间进行加工，订单内的工件按种类分批并批量加工。考虑一种序列相关准备时间，其取决于每台机器紧邻加工时的两个工件种类，包括换刀、清洁、夹具调整等准备时间，忽略同类工件紧邻加工时的准备时间。同时，考虑一种基于机器位置和批次内工件数量的转运时间。因此对该问题做如下假设：

- (1) 每台机器任意时刻可用，允许空闲。
- (2) 每个批次中的工件零时刻可连续加工，前后工序间按批次转运。
- (3) 机器在一个时刻最多进行一个订单、一个批次的一个工件的加工。
- (4) 每位客户订单唯一，且同一订单内工件交期统一，允许拖期，不同客户订单拖期惩罚不同但可量化。

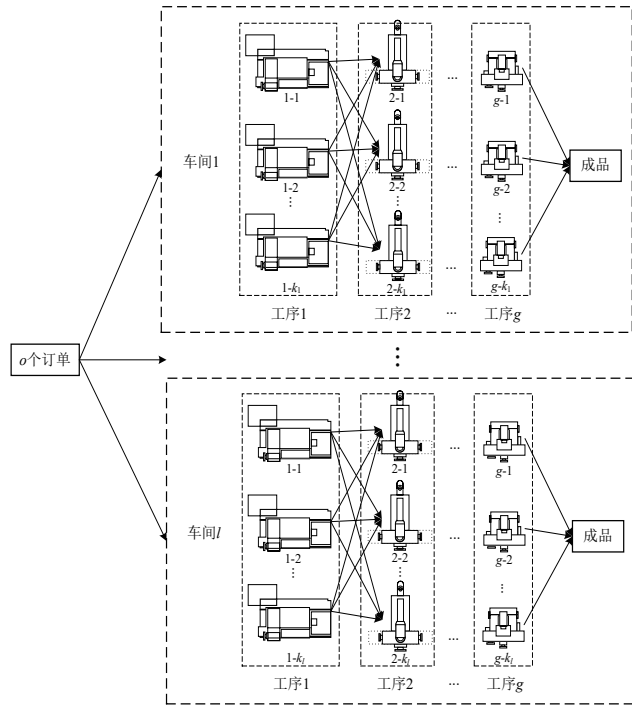


图 1 DHHFSP 示意图

DHHFSP 包括车间分配、机器分配和工件加工序列 3 个子问题，其之间存在着强耦合关系^[19]。本文优化目标是在考虑订单约束的情况下，寻求三者之间的合理调度，以实现最大完工时间和总加权拖期的最小。其中最大完工时间包括工件前后工序的转运时间、序列相关准备时间和机器加工时间等。总加权拖期为考虑每个订单拖期惩罚度的加权拖期和，其中每位客户订单的实际交期为该订单内最后完工的工件批的完工时间。

1.2 符号定义

本文中的相关符号定义，如表 1 所示。

表 1 符号定义

符号	描述
F_l	车间集合，索引 $l \in \{1, 2, \dots, f\}$
O_h	订单集合，索引 $h \in \{1, 2, \dots, o\}$
G_j	工序集合，索引 $j \in \{1, 2, \dots, g\}$
A_i	所有订单包含的工件种类集合，索引 $i \in \{1, 2, \dots, a\}$
A_h	订单 h 包含的工件种类集合， $A_h \in A_i$
$R_{h,i}$	订单 h 按工件种类分批的批次集合
$N_{h,i}$	订单 h 的 i 类工件总数
$M_{l,j,k}$	车间 l 工序 j 的并行机集合，索引 $k \in \{1, 2, \dots, m_{l,j}\}$
$P_{i,j,k}$	i 类工件在机器 $M_{l,j,k}$ 上的单个加工时间
$B_{h,i,j}$	订单 h 的 i 类工件批工序 j 加工开始时间
$E_{h,i,j}$	订单 h 的 i 类工件批工序 j 加工结束时间
T_h	订单 h 的计划交货期
C_h	订单 h 的实际完工时间
V_h	订单 h 的拖期惩罚度
$Q_{q,i,j}$	工序 j 的机器在 q 类工件加工完成后紧邻加工 i 类工件的准备时间， $q \neq i$ ； $Q_{0,i,j}$ 表示工序 j 的机器首次加工的是 i 类工件的准备时间
$T_{l(j-1),k,j,k}$	从机器 $M_{l(j-1),k}$ 到机器 $M_{l,j,k}$ 单个工件的转运时间，忽略工件到首道工序机器的时间 ($j > 1$)
T_t	总加权拖期
$C_{\max}$	最大完工时间
$X_{h,l}$	0-1 决策变量，若订单 h 被分配到车间 l ，则为 1；否则为 0
$Y_{h,i}$	0-1 决策变量，若订单 h 存在 i 类工件，则为 1；否则为 0
$Z_{h,i,l,j,k}$	0-1 决策变量，若订单 h 内 i 类工件批在机器 $M_{l,j,k}$ 上加工，则为 1；否则为 0
$W_{q,i,l,j,k}$	0-1 决策变量，若为 1，表示 q 类工件在机器 $M_{l,j,k}$ 上加工后紧接着加工 i 类工件，否则为 0
D	一个充分大的正数

1.3 数学模型

DHHFSP 的数学模型描述分别用公式表示为：

$$\min C_{\max} = \min(\max(C_h)) \quad (1)$$

$$\min T_t = \min\left(\sum_{h=1}^o \max((C_h - T_h) \cdot V_h, 0)\right) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } C_h \geq \max(E_{h,i,j} \cdot Y_{h,i}) \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^f X_{h,l} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^f \sum_{k=1}^{m_{l,j}} (Z_{h,i,l,j,k} \cdot Y_{h,i}) \leq 1 \quad (5)$$

$$B_{h,i,j} \geq E_{h,i,(j-1)} + T_{l,(j-1),k',j,k} \quad (6)$$

$$E_{h,i,j} \geq E_{h,q,j} + Q_{q,i,j} + P_{i,l,j,k} \cdot N_{h,i} - D(1 - W_{q,i,l,j,k}) \quad (7)$$

$$E_{h,i,g} \geq \sum_{l=1}^f \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^{m_{l,j}} (P_{i,l,j,k} \cdot N_{h,i} \cdot Z_{h,i,l,j,k}) + \sum_{j=1}^g (Q_{q,i,j} \cdot W_{q,i,l,j,k}) + \sum_{l=1}^f \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^{m_{l,j}} (T_{l,(j-1),k',j,k} \cdot N_{h,i} \cdot Z_{h,i,l,(j-1),k'} \cdot Z_{h,i,l,j,k}) \quad (8)$$

其中,式(1)定义了最小化最大完工时间的目标函数;式(2)定义了最小化总加权拖期的目标函数;式(3)限制了每个订单的完工时间不小于订单内任一工件最后一道工序的完工时间;式(4)表示每个订单只会分配到单一车间加工;式(5)表示每个订单内每类产品每道工序只会在一台机器上加工;式(6)表示每个订单每类工件后道工序的开始时间大于等于前道工序的结束时间和转运时间之和;式(7)表示同一机器上后批工件的完工时间不小于前批工件的完工时间、准备时间、后批工件加工时间之和;式(8)表示每个订单的每个工件批最后一道工序完工时间不小于每道工序加工时间、准备时间和机器间转运时间之和。

2 基于 IABC 算法的 DHHFSP

ABC 算法广泛运用在各类车间调度问题中,但在求解多目标 HFSP 时存在收敛速度慢和易陷入局部最优的不足。本文针对 DHHFSP 的特性,对算法进行以下改进:

(1) 设计了同时考虑订单交期和加工时间的种群初始化方法,提高了初始种群的质量。

(2) 针对关键车间和关键订单,设定了雇佣蜂邻域搜索的多个有效邻域,并引用外部档案集和精英选择策略,提高了蜜源的多样性和质量。

(3) 观察蜂阶段,设计了基于各目标的二元锦标赛选择策略以加速收敛。

2.1 编码与解码

考虑订单约束的 DHHFSP 包括车间分配、加工顺序、机器分配 3 个子问题。本文采用两阶段的编码依次解决车间分配和首道工序的加工顺序子问题,后采用基于启发式规则的动态解码机制确定其他工序的加工顺序和机器选择。

编码第一阶段,考虑到同一订单的所有工件都是统一分配到同一车间,采用订单、车间双层编码表示车间分配。订单层和车间层长度都为订单总数,两层编码一一对应,表示把订单分配到对应的车间。

编码第二阶段,需要解决每个车间分配到的订单首道工序工件批的加工顺序,用编码序列 $\pi = \{\pi_1; \pi_2; \dots; \pi_i; \dots; \pi_j\}$ 表示一个可行解。每个 π 包括 f 维,每一维表示一个车间的首道工序工件批加工序列。 π_1 由若干个 $O_{h,i,n}$ 组成,其中 h 表示订单号, i 表示工件种类号, n 表示订单 h 内 i 类工件的数量,

π_1 内 $O_{h,i,n}$ 总数为分配到车间 l 的各订单的工件种类数之和。以 3 个订单、4 种工件、2 个车间为例,一个可行解编码如图 2 所示。订单 1 和 2 分配到车间 1, 订单 3 分配到车间 2。车间 1 首道工序按照订单 1 的第 1 类工件批 $\rightarrow$ 订单 2 的第 1 类工件批 $\rightarrow$ 订单 1 的第 3 类工件批的顺序加工。车间 2 首道工序按照订单 3 的第 2 类工件批 $\rightarrow$ 订单 3 的第 4 类工件批的顺序加工。

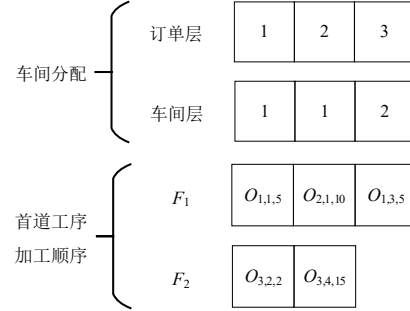


图 2 编码示意图

本文使用一种基于启发式规则的解码机制:非首道工序的工件加工顺序遵循先到先服务(FCFS)规则,即前道工序先完工的工件批优先进行加工;工件批每道工序的机器选择按照上批次工件种类和机器最早空闲时间(FAM)进行选择,即优先选择上一批次工件种类相同的机器以降低准备时间,次级选择本道工序完工时间最小的机器,若两个机器条件都相同,则选择编号小的机器。

2.2 考虑加工时间和交期的种群初始化策略

初始种群的多样性和质量将直接影响算法后续的收敛速度和搜索效果,根据本文优化目标,使用完全随机方式和启发式规则各生成 $0.5 \times SN$ 的初始种群, SN 为种群规模,具体规则如下:

(1) 完全随机规则:将每个订单随机分配到某个车间,保证每个车间至少有 1 个订单,之后再随机生成每个车间所有订单的工件批次加工顺序。

(2) 启发式规则:按照订单交期从小到大排列,并依次将每个订单分配到当前累积综合加工时间 T_l 最小的车间, T_l 如式(9)所示,其中 T_l' 表示车间 l 已累积的综合加工时间,初始为 0;之后对每个车间分配到的订单,随机选择每个订单,再将订单的所有工件批次优先插入到同种工件批次的后一位置以减少准备时间,缺少的工件批次则随机插入任意位置。这种方式既考虑了订单的交货紧迫程度,又考虑了订单的完工时间,可有效获得较优的初始个体。

$$T_l = T_l' + \sum_{i=1}^a \left(\left(\sum_{j=1}^g \frac{\sum_{k=1}^{m_{l,j}} P_{i,l,j,k} \cdot N_{h,i}}{m_{l,j}} \right) \cdot Y_{h,i} \right) \quad (9)$$

2.3 雇佣蜂多邻域搜索

雇佣蜂阶段，雇佣蜂会在蜜源集内的每个蜜源附近进行多邻域搜索，再对搜索到的所有蜜源和原蜜源进行快速非支配排序，并将非劣蜜源的位置和适应度信息保存到外部集中，之后对外部集采用精英选择策略，生成子代蜜源集。上述雇佣蜂的邻域搜索重复 cycle 次后，雇佣蜂会将子代蜜源集的信息传递给观察蜂。多邻域搜索策略包含了针对关键车间和关键订单的 7 个邻域，其中 $S_1 \sim S_4$ 与最大完工时间最大的关键车间有关， $S_5 \sim S_7$ 与总加权拖期最大的关键订单相关，具体邻域如下：

- (1) 关键车间订单交换。随机选取关键车间 F_a 中的一个订单，将其与另一随机车间的任一订单交换，再将两个订单的各工件批次随机插入到对应车间加工序列中。
- (2) 关键车间订单转移。随机选取关键车间 F_a 中的一个订单，将其插入到另一随机车间，即将订单的所有工件批次随机插入到对应车间加工序列中。
- (3) 关键车间工件批插入。随机选择关键车间 F_a 加工序列中的两个位置，将靠后位置的工件批插入到靠前的位置。
- (4) 关键车间工件批倒序。随机选择关键车间 F_a 加工序列中的两个位置，将两个位置之间的工件全部进行倒序。
- (5) 关键订单工件批插入。选择关键订单 O_a 最后完工的工件批，将其插入到原位置之前的任意位置。
- (6) 关键订单转移。将关键订单 O_a 的所有工件批从原车间加工序列中取出，再全部随机插入到任意一个车间（含原车间）的加工序列中。
- (7) 关键订单交换。将关键订单 O_a 与任意一个其他车间的任意一个订单交换车间，并随机插入对应车间的加工序列中。

2.4 观察蜂选择策略

观察蜂阶段，观察蜂会使用二元锦标赛方法对雇佣蜂保留的蜜源进行择优选择和邻域搜索，并生成新蜜源集。具体步骤为：针对单一目标，每次随机选择两个蜜源进行对比，并将较优的蜜源进行 2.3 节的多邻域搜索，为避免最优蜜源被重复对比，选中的蜜源不放回。二元锦标赛策略会分别针对问题的每个目标重复进行，直到新蜜源集达到原有规模。

2.5 侦查蜂更新策略

为避免算法陷入最优，如果某个蜜源超过指定的 limit 次还未更新，则侦查蜂会在全局内进行随机搜索，随机搜索方式同 2.2 节的完全随机规则，并用随机搜索到的新蜜源替换原蜜源。

2.6 算法步骤

本文的 IABC 算法主要步骤如下：

- (1) 初始化参数，生成初始种群。
- (2) 雇佣蜂邻域搜索，保存非劣解到外部集，并用精英选择策略生成子代蜜源集，重复 cycle 次。
- (3) 观察蜂针对每个目标进行二元锦标赛选择，并对被选到的非劣蜜源进行邻域搜索，生成新蜜源集。
- (4) 侦查蜂根据每个蜜源的未更新次数，确定是否由随机搜索的新蜜源替换。
- (5) 如果满足终止条件，则输出蜜源集，否则转至步骤 (2)。

3 试验结果及分析

为测试所提 IABC 算法对于考虑订单约束的 DHHFSP 的有效性，进行算例设计与试验。实验使用 Python 3.9 编程实现，并运行在具有 16.0 GB RAM、3.20 GHz CPU 的计算机上。

3.1 试验设计

考虑订单约束的 DHHFSP 还没有标准测试集，按照以下方式生成测试用例。工厂数 $f = \{2, 3\}$ ，工件总种类数 $a = \{3, 8\}$ ，订单数 $o = \{10, 20\}$ ，工序数 $g = \{3, 5, 10\}$ ，由此生成 24 种算例。其他基础数据：每个订单包含的工件种类数为工件总种类数的子集，订单内各类工件数量为 $[1, 20]$ 之间均匀分布的整数，每道工序机器数为 $[1, 5]$ 之间均匀分布的整数，单个工件每道工序的加工时间为 $[1, 20]$ 之间均匀分布的整数，序列相关准备时间为服从 $U[1, 10]$ 的整数，机器间单个工件转运时间为 $[0.1, 0.5]$ 之间的保留一位小数的随机数，订单计划交货期为服从 $U[1 \times a \times o, 50 \times a \times o]$ 的随机整数，拖期惩罚度为服从 $U[1, 5]$ 的整数。算法的终止条件为算法运行时间，为保证算法对各算例都能够收敛，最大运行时间设定为 $(f \times a \times o \times g \times \mu)$ ms， μ 为常数，此处设为 50，每个算例独自运行 10 次取平均值。

3.2 参数设置

合理的参数选择有利于提高算法的性能，为确定算法控制参数的最佳组合，在一定的测试基础上，设计出初始种群数量 SN、邻域搜索次数 cycle 和蜜源保留次数 limit 的三因素三水平正交实验，各参数水平如表 2 所示。

表 2 参数水平表

因素	水平 1	水平 2	水平 3
SN	40	80	120
cycle	4	6	8
limit	3	5	7

考虑各因素不同水平间的交互作用，选择 L9 正交表对 $f/a/o/g = 2/3/10/3$ 的算例进行实验，将每种参数组合运行得到的非支配解集设定为真实 Pareto 前沿解集，并对各组合以反世代距离 (IGD) 为评价指标独立运行 10 次取均值，

运行时间都设定为 9 s，具体的参数组合和实验结果如表 3 和图 3 所示，可知算法在参数 SN=40、cycle=6、limit=3 时表现最好。

表 3 正交试验表

序号	SN	cycle	limit	IGD
1	40	4	7	121.879
2	40	6	5	81.559
3	40	8	3	89.715
4	80	4	3	132.173
5	80	6	7	109.345
6	80	8	5	131.149
7	120	4	5	144.138
8	120	6	3	109.922
9	120	8	7	138.767

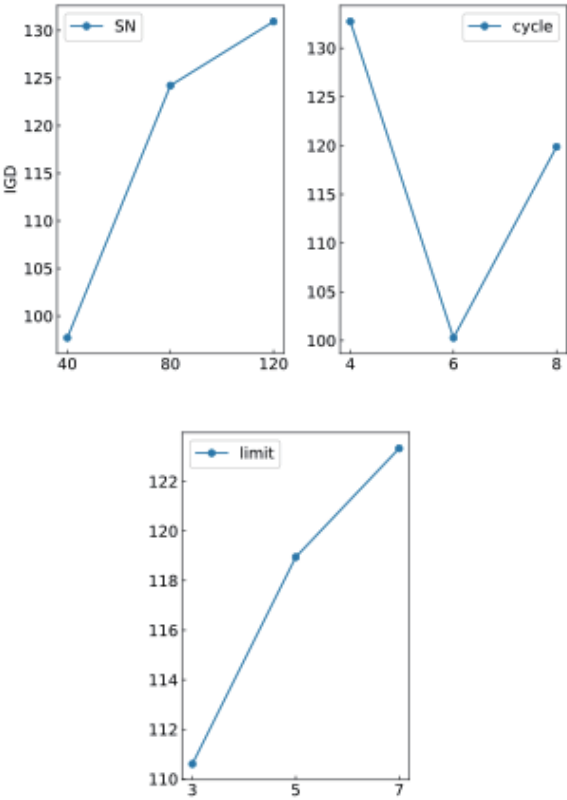


图 3 参数水平响应图

3.3 试验结果及分析

确认 IABC 算法的各参数选择之后，为了验证算法的性能，将其与 NSGA II、MOEA/D 进行覆盖率度量（coverage metric, C-metric）和反世代距离（inverse generational distance, IGD）的对比。为保证算法之间对比的公平性，算法的编解码方式尽量相同，并尽可能共享代码，最大运行时间都相同，真实 Pareto 前沿解集由几种算法独立运行 10 次得到的

非支配解集组成。计算结果如表 4 所示，较优的标粗显示。此处 C-metric 指标设定为真实 Pareto 前沿解集支配每个算法预测的 Pareto 前沿解集的比例，由 C-metric 指标可知，在所有算例下，IABC 算法得到的覆盖率都小于其他算法，这表明 IABC 算法得到的解优于另外两种算法的解，更接近于真实 Pareto 解集。由 IGD 指标可知，在所有算例下，IABC 算法的 IGD 都小于对比算法，证明 IABC 算法的收敛性和多样性都优于另外两种算法。

表 4 算法性能对比

<i>f/a/o/g</i>	C-metric			IGD		
	IABC	NSGAI	MOEA/D	IABC	NSGAI	MOEA/D
2/3/10/3	0.391	0.578	0.771	44.787	177.839	240.540
2/3/10/5	0.220	0.561	0.875	172.744	258.708	320.855
2/3/10/10	0.262	0.405	0.881	221.094	588.877	1 047.186
2/3/20/3	0.304	0.435	0.833	203.284	328.397	513.158
2/3/20/5	0.333	0.533	0.812	127.883	2 285.854	1 321.210
2/3/20/10	0.375	0.667	0.943	281.611	841.128	3 576.103
2/8/10/3	0.001	0.885	0.857	35.963	440.306	477.655
2/8/10/5	0.368	0.500	0.750	40.826	173.740	185.879
2/8/10/10	0.256	0.572	0.940	180.258	262.388	659.099
2/8/20/3	0.185	0.738	0.963	360.627	1 447.496	1 107.880
2/8/20/5	0.259	0.438	0.905	380.665	424.586	3 378.137
2/8/20/10	0.263	0.692	1.000	557.081	2 068.418	3 356.156
3/3/10/3	0.134	0.635	0.946	51.207	53.576	121.830
3/3/10/5	0.143	0.750	0.907	26.495	167.750	131.810
3/3/10/10	0.267	0.622	0.956	84.413	672.619	744.979
3/3/20/3	0.091	0.667	0.878	164.990	312.078	317.073
3/3/20/5	0.167	0.677	0.913	131.820	154.212	266.284
3/3/20/10	0.150	0.781	0.865	332.727	1 030.307	1 156.864
3/8/10/3	0.222	0.489	0.922	65.525	317.727	342.530
3/8/10/5	0.385	0.750	0.844	101.613	305.032	512.418
3/8/10/10	0.500	0.457	0.933	196.109	560.953	999.787
3/8/20/3	0.063	0.875	0.943	339.673	490.956	1 234.388
3/8/20/5	0.233	0.667	0.901	246.848	2 305.722	2 964.053
3/8/20/10	0.048	0.764	0.986	751.778	1 541.197	1 951.448

4 结论

以最小化最大完工时间和总加权拖期为目标，建立了考虑订单约束的 DHHFSP 模型。提出了一种改进的 ABC 算法，根据问题特性设计了启发式的初始化策略，并基于关键车间和订单设计了多个邻域，在雇佣蜂和观察蜂阶段分别引入了精英选择策略和二元锦标赛选择策略。从试验结果可看出，

所提算法求解该问题对比常见的多目标优化算法,收敛性、多样性更优。本文假设每位客户订单的同种工件分为一批,未考虑到订单内同种工件分为多批的情形,在未来的研究中将考虑工件分批和订单约束的 DHHFSP,并进一步对 ABC 算法进行优化,以提升算法性能。

参考文献:

- [1] 朱光宇,贾海斌.面向半导体车间多目标可重入调度研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(2):122-130.
- [2] 张中伟,孟亚,李艺,等.考虑工件分批的混合流水车间节能调度研究[J].制造技术与机床,2022(8):161-170.
- [3] 唐红涛,刘子豪,官思佳.资源受限下单批耦合混合流水车间调度问题研究[J].工业工程,2023,26(4):114-123.
- [4] 张清勇,王皓冉,雷德明.求解分布式并行机调度的新型帝国竞争算法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(8):86-91.
- [5] 王凌,王晶晶.考虑运输时间的分布式绿色柔性作业车间调度协同群智能优化[J].中国科学:技术科学,2023,53(2):243-257.
- [6] 邵伟世,皮德常,邵仲世.学习驱动的分布式异构混合流水车间批量流能效调度优化[J].控制理论与应用,2024,41(6):1018-1028.
- [7] TAO X R, PAN Q K, GAO L. An efficient self-adaptive artificial bee colony algorithm for the distributed resource-constrained hybrid flowshop problem[J]. Computers & industrial engineering, 2022, 169: 108200.
- [8] CAI J C, LEI D M. A cooperated shuffled frog-leaping algorithm for distributed energy-efficient hybrid flow shop scheduling with fuzzy processing time[J]. Complex & intelligent systems, 2021, 7: 2235-2253.
- [9] LEI D M, SU B. A multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling[J]. Knowledge-based systems, 2023, 263: 110252.
- [10] WANG J J, WANG L. A cooperative memetic algorithm with learning-based agent for energy-aware distributed hybrid flow-shop scheduling[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2022, 26(3): 461-475.
- [11] CUI H H, LI X Y, GAO L. An improved multi-population genetic algorithm with a greedy job insertion inter-factory neighborhood structure for distributed heterogeneous hybrid flow shop scheduling problem[J]. Expert systems with applications, 2023, 222(15): 119805.
- [12] SHAO W S, SHAO Z S, PI D C. Modelling and optimization of distributed heterogeneous hybrid flow shop lot-streaming scheduling problem[J]. Expert systems with applications, 2023, 214(15): 119151.
- [13] LI Y L, LI X Y, GAO L, et al. An improved artificial bee colony algorithm for distributed heterogeneous hybrid flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times[J]. Computers & industrial engineering, 2020, 147: 106638.
- [14] LIU H, ZHAO F Q, WANG L, et al. Evolutionary multitasking memetic algorithm for distributed hybrid flowshop scheduling problem with deterioration effect[J]. IEEE transactions on automation science and engineering, 2024, 22: 1390-1404.
- [15] SHAO W S, SHAO Z S, PI D C. An ant colony optimization behavior-based MOEA/D for distributed heterogeneous hybrid flow shop scheduling problem under nonidentical time-of-use electricity tariffs[J]. IEEE transactions on automation science and engineering, 2021, 19(4): 3379-3394.
- [16] ZHENG Y, PENG N, QI H, et al. An improved memetic algorithm for distributed hybrid flow shop scheduling problem with operation inspection and reprocessing[J]. Measurement and control, 2025, 58(1): 68-96.
- [17] MENG T, PAN Q K, WANG L. A distributed permutation flowshop scheduling problem with the customer order constraint[J]. Knowledge-based systems, 2019, 184(5): 104894.
- [18] 李浩然,高亮,李新宇.基于离散人工蜂群算法的多目标分布式异构零等待流水车间调度方法[J].机械工程学报,2023,59(2):291-306.
- [19] 雷德明,苏斌.基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度[J].控制与决策,2021,36(2):303-313.

【作者简介】

徐斌(1984—),男,安徽潜山人,博士,副教授,研究方向:制造业信息化、制造智能技术, email:xubin@ahut.edu.cn。

毕家乐(1998—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向:流水车间调度, email:bijiale666@163.com。

(收稿日期:2024-12-23 修回日期:2025-04-29)