

时间约束混合流水车间调度问题综述

李俊青^{1†}, 李文涵¹, 陶昕瑞², 杜宇¹, 韩玉艳², 潘全科³

(1. 山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014;

2. 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 250059; 3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 车间调度是智能制造领域中的核心问题之一, 在经典流水车间调度中, 所有工件按照相同的加工顺序在指定机床上加工. 混合流水车间调度(HFS)作为流水车间调度的特例, 相比前者增加了机床选择的灵活性, 可以显著优化系统目标, 但同时也增加了问题求解的难度. 由于时间约束HFS相比基本HFS问题更贴近实际生产过程, 近年来, 综合考虑各类时间相关约束的HFS问题得到了深入研究. 因此, 本文围绕基本HFS、有限等待时间HFS、带准备时间HFS、模糊/随机加工时间HFS、多时间约束HFS、时间约束相关多目标HFS等问题开展研究. 针对每一类时间约束HFS问题, 按照问题规模对当前研究成果进行分类描述, 按照确定性算法、启发式方法、元启发式方法、算法混合对相关成果进行算法分类, 按照实际工业应用对文献进行归类分析. 另一方面, 围绕交货期、能耗、成本等3类性能指标, 分析了在各类时间约束HFS问题中的多目标优化相关成果. 最后详细分析了带时间约束HFS问题在问题层面、算法层面和应用层面存在的挑战性问题和未来研究的方向.

关键词: 混合流水车间调度; 无等待约束; 准备时间约束; 模糊/随机加工时间约束; 多时间约束; 多目标优化

引用格式: 李俊青, 李文涵, 陶昕瑞, 等. 时间约束混合流水车间调度问题综述. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2273 – 2290

DOI: 10.7641/CTA.2020.00077

A survey on time constrained hybrid flow shop scheduling problems

LI Jun-qing^{1†}, LI Wen-han¹, TAO Xin-rui², DU Yu¹, HAN Yu-yan², PAN Quan-ke³

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan Shandong 250014, China;

2. School of Computer, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 250059, China;

3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Scheduling is one of the key technology of intelligent manufacturing, in typical flow shop scheduling, all jobs should be processed according to the same sequence through all the given machines. As an extension of the classical flow shop, in hybrid flowshop scheduling(HFS), all jobs should select one suitable machine from a set of candidate machines, which increase the flexibility, and thus improve the performance significantly. Nevertheless, the complexity of the system is also increased and thus the problem is even more hard to be solved. Therefore, we give a survey on researches of several time-constrained HFS problems, including the canonical HFS, HFS with limited wait time constraints, HFS with setup time constraints, HFS with fuzzy or stochastic processing times, HFS with multiple time constraints, and time-constrained multi-objective HFS. For each type of time-constrained HFS, firstly, the literatures are classified according to their problem scales. Then, all the researches are categorized into four types according to exact algorithm, heuristics, meta-heuristics, and hybrid algorithms. Further, the realistic applications of the related time-constrained HFS are also analyzed. Meanwhile, the algorithms about the multiple objectives are also analyzed according to three aspects, i.e., considering the due dates, energy consumption, and costs. Lastly, from problem features, algorithm classification, and the application aspects, the time-constrained HFS are summarized both in challenging problems and future research focuses. The problem features, algorithms, and typical applications about these problems are reviewed. Finally, we also give a brief description about the future challenging issues of the HFS with special process constraints.

Key words: hybrid flow shop; no-wait constraint; setup time constraint; fuzzy or stochastic processing time constraint; multiple time-constrained; multi-objective optimization

Citation: LI Junqing, LI Wenhan, TAO Xinrui, et al. A survey on time constrained hybrid flow shop scheduling problems. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(11): 2273 – 2290

收稿日期: 2020-02-13; 录用日期: 2020-06-09.

[†]通信作者. E-mail: lijunqing@lcu-cs.com; Tel.: +86 15063528919.

本文责任编辑: 王凌.

国家自然科学基金项目(61773192, 61803192, 61773246), 山东省高等学校科技计划项目(J17KZ005)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61773192, 61803192, 61773246) and the Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (J17KZ005).

1 引言

工业和信息化部、财政部联合制定的《智能制造发展规划(2016—2020年)》指出,智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的新生产方式.生产过程的优化是智能制造关键核心环节之一,对于企业有着重要的现实意义,例如可以有效降低能耗、提高设备利用率、减少工序提前/滞后加工的成本,提高企业生产效率,进而对国民经济可以产生深远影响.调度优化问题是生产过程优化的瓶颈问题之一,混合流水车间调度(hybrid flowshop scheduling, HFS)问题是调度问题中的典型问题,在近年来得到了广泛关注.目前,诸多实际生产过程,譬如玻璃

生产、炼钢过程、航空复合材料制造等过程,可以建模为混合流水车间调度问题^[1-2].

在HFS中,加工流程划分为若干阶段,每个加工阶段由若干同型或异构设备组成.任何一个工件需要严格按照相同的加工顺序依次流经每个加工阶段,到达任意阶段时,可以从多个并行设备中选择一个进行加工.图1给出了典型HFS调度示意图.经典HFS问题属于非确定性多项式(non-deterministic polynomial, NP)难题,目标的搜索涉及解空间的组合爆炸,因而,传统的精确求解算法难以应用于较大规模HFS调度问题的求解过程^[1-5].图2展示了1995年以来,HFS和带时间约束的HFS问题相关论文年度统计图.由图可见,HFS问题和带时间约束的HFS问题在近十年得到了广泛关注和研究.

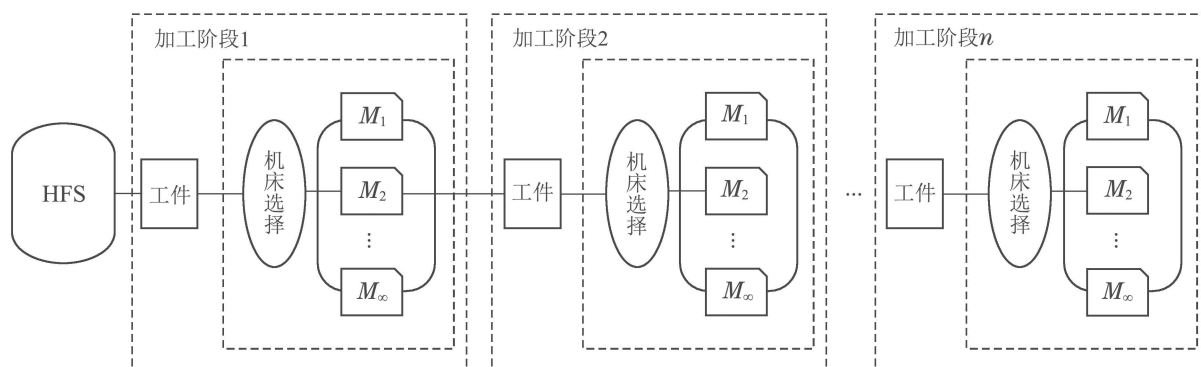


图1 基本HFS示意图

Fig. 1 Chart of the canonical HFS

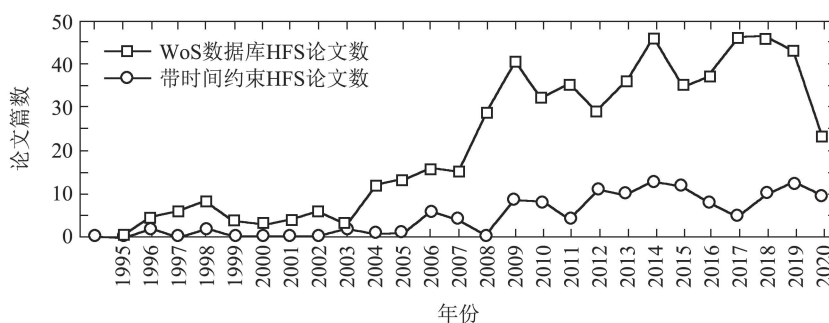


图2 混合流水车间调度论文年度统计图

Fig. 2 Chart of the research of HFS by years

在实际生产过程中,譬如炼钢过程、纺织生产、玻璃加工、半导体制造、航空材料加工等过程,由于增加了有限等待时间、准备时间、模糊/随机加工时间等特定时间相关约束条件,使得实际生产过程存在的多约束HFS调度问题变得更为复杂,因而相比传统的HFS难度更大.主要体现在以下几个方面:

1) HFS需要考虑两个方面的任务,即机床选择和工件排序. HFS作为流水车间调度的特例,相比流水

车间调度增加了每个加工阶段机床选择的工作,因而,相比流水车间调度, HFS问题结构和特性更加复杂,优化目标、约束和假设条件更加多样化.如何结合问题特征、约束条件和目标特点,设计启发式策略和元启发式算法,无疑对算法设计形成了挑战.

2) 实际生产中的调度问题,需要考虑的约束条件众多,与时间相关的有带有限等待时间、带准备时间、模糊/随机加工时间等约束,上述特定工艺下的时间约

束HFS, 增加了问题建模的变量, 只有统筹考虑各方面因素, 实现变量的协同优化, 才能取得较好的优化效果.

3) 多约束问题更加贴近实际生产调度, 同时也使得问题求解变得更加复杂, 建模难度增大, 优化算法考虑的约束条件众多, 可行解很难寻找, 全局最优解更加困难.

分析上述HFS难点问题可见, HFS调度问题相比传统流水线调度问题更为复杂, 其研究具有更重要的学术意义与应用价值, 相关研究在有限等待时间、准备时间、模糊/随机加工时间等时间约束HFS下取得了一定的成果. 如何更好地结合问题特性, 构建问题领域知识驱动的优化算法, 更好的结合问题约束和目标, 还有待深入研究.

由于HFS调度问题广泛存在于实际问题中, 对此, 本文围绕基本HFS、带有限等待HFS、带准备时间HFS、模糊/随机加工时间HFS、多时间约束HFS、时间约束相关多目标HFS等问题, 重点综述时间约束HFS问题、算法和应用等方面的代表性成果, 最后阐述了时间约束HFS问题在未来可能遇到的挑战.

2 基本混合流水车间调度问题

2.1 问题特征

基本混合流水车间调度(HFS)问题可以描述为: 有 m 个加工阶段, n 个工件, 每个工件都有 m 道工序, 工件 j 的第 k 道工序定义为 $O_{j,k}$, 工序 $O_{j,k}$ 在第 k 个加工阶段加工, 并可以在其可用机床集合内选择一个可用机床进行加工. 问题求解的目标一般为最小化最大完工时间Makespan. 图1给出了基本HFS的示意图, 图中分为两部分任务, 即工件排序和机床选择. 每个工件在 s 个加工阶段需要分别选择一个可用机床, 所有工件需要在所分配的机床上排序调度.

混合流水车间调度根据假设条件、约束等不同, 又可以分为很多类型, 上述假设与约束可以表示为经典的三元组 $\alpha|\beta|\gamma$. 其中: α 表示车间工况信息, β 表示约束和假设条件, γ 表示目标函数.

1) 车间工况信息 α 包含加工阶段数量, 每个加工阶段的机床数量及特点. 通常, α 包含4个参数: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 . 其中: α_1 表示一般工况信息, 在此 $\alpha_1 = FH$; α_2 表示车间加工阶段数量; α_3 和 α_4 两个参数表示了每个加工阶段机床的数量和特性. $(\alpha_3, \alpha_4)^k$ 表示在加工阶段 k 有 α_4 个类型为 α_3 的并行加工机床. $\alpha_3 \in \{\emptyset, P, Q, R\}$, 其中: P 表示并行多机 (identical parallel machine), Q 表示同类并行机 (uniform parallel machines), R 表示不相关并行机 (unrelated parallel machines)^[6].

2) 约束和假设条件 β , 包含了车间约束条件, 常见约束条件包含:

- r_j : 工件释放时间约束, 表示工件 j 在其释放时间 r_j 之前不能开工.
- pmu : 置换流水约束, 表示工件在每个加工阶段的加工次序保持不变.
- prec : 偏序约束, 表示不同工件的工序之间的加工先后约束.
- M_j : 机床可用约束, 表示工件 j 在加工阶段 k 的可用机床集合是 M_j .
- s_{jk} : 准备时间约束, 表示工件 j 和 k 存在工序相关的准备时间.
- prmp : 抢占约束, 表示工件在加工中可以被中断.
- block : 缓冲区约束, 表示加工阶段之间的缓冲区大小有限, 工件必须在前一个加工阶段等待直到有足够的缓冲区.
- recrc : 可重入约束, 表示工件可以在同一个加工阶段重入或多次加工.
- unavail : 机床不可用约束, 表示加工机床在整个加工时间不可用.
- nwt : 无等待约束, 表示工件在不同加工阶段之间不允许等待.
- limit-wait : 表示有限等待约束.
- no-idle : 零空闲约束, 表示机床在开工后不允许空闲.
- PM : 预防性维修约束.
- brkdwn : 机床故障约束 (machine breakdown).
- jinst : 工件插入约束 (job insertion).
- $p_j = p$: 表示所有加工时间相同.
- p_{fuzzy} : 模糊时间约束, 表示加工时间是一个三角模糊数.

- $p_{\text{uncertain}}$: 不确定加工时间约束.
- p_{depend} : 机床或资源相关的加工时间约束.
- $\text{size}_{i,j}$: 表示工序 $O_{i,j}$ 必须在 $\text{size}_{i,j}$ 个机床上同时加工.

3) γ 表示问题目标, 常见目标函数有:

- $C_{\max} = \max_j C_j$: 最大完工时间 (maximum completion time).
- $F_{\max} = \max_j (C_j - r_j)$: 最大流经时间 (maximum flow time).
- $L_{\max} = \max_j L_j$: 最大工件延迟 (maximum lateness), 其中 $L_j = C_j - d_j$ 表示工件 j 的延迟时间, d_j 是工件 j 的交货期.
- $T_{\max} = \max_j T_j$: 最大滞后时间 (maximum tardiness), 其中 $T_j = \max\{C_j - d_j, 0\}$ 表示工件 j 的

滞后时间.

• $E_{\max} = \max_j E_j$: 最大提前时间 (maximum earliness), 其中 $E_j = \max\{d_j - C_j, 0\}$ 表示工件 j 的提前时间.

• $\bar{C} = \sum C_j/n$: 平均完工时间.
 • $\sum C_j$: 总完工时间.
 • $\bar{C}^w = \sum w_j C_j/n$: 平均加权完工时间.
 • $\sum w_j C_j$: 总加权完工时间.
 • $\tilde{C}_{\max} = \max_j \tilde{C}_j$: 最大模糊或不确定完工时间.

• $\bar{F} = \sum F_j/n$: 平均流经时间.
 • $\sum F_j$: 总流经时间.
 • $\bar{F}^w = \sum w_j F_j/n$: 平均加权流经时间.
 • $\sum w_j F_j$: 总加权流经时间.
 • $\bar{T} = \sum T_j/n$: 平均延迟时间.
 • $\sum T_j$: 总延迟时间.
 • $\bar{T}^w = \sum w_j T_j/n$: 平均加权延迟时间.
 • $\sum w_j T_j$: 总加权延迟时间.
 • $\bar{U} = \sum U_j$: 延迟工件数量, 其中 $U_j \in \{1, 0\}$ 当工件 j 延迟交货时取1, 否则, 取0.

• $\sum E_j$: 总提前时间.
 • $\bar{E}^w = \sum w_j E_j/n$: 平均加权提前时间.
 • So_j : 工件 j 的滞留时间 (sojourn time).
 • $\sum w_j So_j$: 总加权滞留时间.
 • $\bar{So} = \sum w_j So_j/n$: 平均加权滞留时间.
 • TP_k : 机床 k 的加工工件时间.
 • TW_k : 机床 k 的待机时间.
 • EP_k : 机床 k 的加工能耗.
 • EW_k : 机床 k 的待机能耗.
 • TEC : 总能耗.
 • $\sum_{k=1}^m TP_k$: 总机床加工时间.
 • $\sum_{k=1}^m TW_k$: 总机床待机时间.
 • $\sum_{k=1}^m w_k TP_k$: 总加权机床加工时间.
 • $\sum_{k=1}^m w_k TW_k$: 总加权机床待机时间.
 • $\sum_{k=1}^m EP_k$: 总机床加工能耗.
 • $\sum_{k=1}^m EP_k$: 总机床待机能耗.
 • $\sum_{k=1}^m w_k EP_k$: 总加权机床加工能耗.
 • $\sum_{k=1}^m w_k EW_k$: 总加权机床待机能耗.
 • ev_{mbc} : 机床利用率、缓冲区利用率、完工时间

的平均期望值.

• CT: 循环周期.
 • $\delta_{\max}$: 交货期偏差容忍度.
 • rac: 资源分配成本.
 • mac: 机床分配成本.

2.2 HFS复杂性分析

HFS调度问题是经典FSP问题的特例. Garey和Johnson(1976)^[7]证明最小化Makespan目标的HFS调度问题是NP-C(NP-complete)问题. 对于两个加工阶段的HFS调度问题, 在最小化Makespan目标下 ($F2(1, P_m) || C_{\max}$), Gupta(1988)^[8]证明是一个NP-完全 (unary NP-complete) 问题. 对于两个加工中心, 任一加工中心包含多个加工机床的HFS调度问题, Hoogeveen等(1996)^[9]证明其在可抢占 ($F2(1, P_m) | prmt | C_{\max}$) 和不可抢占 ($F2(1, P_m) || C_{\max}$) 两种模式下都是一元NP-完全问题. Vignier等(1996)^[10]证明可抢占式两阶段HFS调度问题, 以最小化Makespan为目标, 第1个加工阶段有两台并行机床, 第2个加工阶段有一台机床的情况下 ($F2(P2, 1) | prmt | C_{\max}$), 是一个强NP-难 (NP-hard in the strong sense) 问题. Yang(2010)^[11]证明, 对于包含两个加工中心, 第2个加工中心的机床有指定分配 (dedicated machines) 约束的HFS调度问题 ($F2(P_{k=1}^2) | prmt | C_{\max}$), 是一个一元NP-完全 (unary NP-complete) 问题. Yang(2015)^[12]证明第1个加工中心包含机床指派约束, 以最小化总流经时间为目标的两阶段HFS调度问题 ($F_2 P2d, 1 || \sum C_j$) 是NP-难问题. 针对 m 个加工中心的HFS调度问题, Quadri和Kuhn(2007)^[13]证明带有批加工 (batch)、工件跳跃的HFS调度问题 ($F_m, P_{k=1}^m | skip, batch | \bar{F}, cost$) 是NP-难问题. Ruiz等(2008)^[14]证明包含机床可用约束 (machine availability) 和工件跳跃 (job skipping) 约束的混合柔性流水线问题 (hybrid flexible flow line problem, HFFL) ($F_m, P_{k=1}^m | skip, rm, lag, S_{sd}, M_j, prec | C_{\max}$) 是一个NP-难问题. 文[15]证明了最小化滞后惩罚 (tardiness) 目标的HFS调度问题 ($F_m, P_{k=1}^m | skip | \bar{T}$) 是一个NP-难问题. 文[16]针对带有多处理器加工的HFS调度问题 ($F_m, P_{k=1}^m | size_{ij} | C_{\max}$), 其中, ($F_m, P_{k=1}^m$) 表示并行机器加工环境, $size_{ij}$ 表示多处理器加工特性, $C_{\max}$ 表示最小化Makespan目标, 证明其是一个强NP-难问题. Naderi等^[17]证明带有序列相关准备时间约束, 以最小化平均流经时间 (flow time) 和平均推迟时间 (tardiness) 为目标的多阶段HFS调度问题 ($F_m, P_{k=1}^m | S_{sd} | \bar{F}, \bar{T}$) 是NP-难问题. Tavakkoli-Moghaddam等(2009)^[18]证明带有加工阻塞 (block)、工件跳跃的HFS调度问题 ($F_m, P_{k=1}^m | skip, block, reentry | C_{\max}$) 是NP-难问题. Jungwattanakit等

(2009)^[19]证明带有准备时间约束, 最小化 makespan 和交货日期惩罚的 HFS ($F_m, P_{k=1}^m | S_{sd}, r_j | \alpha C_{\max} + (1 - \alpha)\bar{U}$) 是 NP-难问题. 文 [20](2009) 证明带有有限缓冲区的 HFS 问题 ($F_m, P_{(k=1)}^m | \text{buffer} | \bar{F}$) 是 NP-难问题.

3 带有限等待时间约束 HFS 调度问题

无等待或有限等待约束表示工件在不同加工阶段之间有限等待时间或不允许等待. 在实际工业生产中, 譬如钢铁生产过程中, 铁水必须在一定温度范围内进行加工, 工件的等待时间是有限的或者无等待加工, 该类问题在近年来得到了广泛关注. 按照上述三元组定义方式, 该类 HFS 调度问题可以定义为

$$FHM|((PM)^k)_{k=1}^m, \text{limit} - \text{wait} | C_{\max}$$

或

$$FHM|((PM)^k)_{k=1}^m, \text{nwt} | C_{\max},$$

其中: limit - wait 表示有限等待约束, nwt 表示无等待约束. 图3给出了无等待约束 HFS (HFS with no-wait, HFS-NW) 示意图.

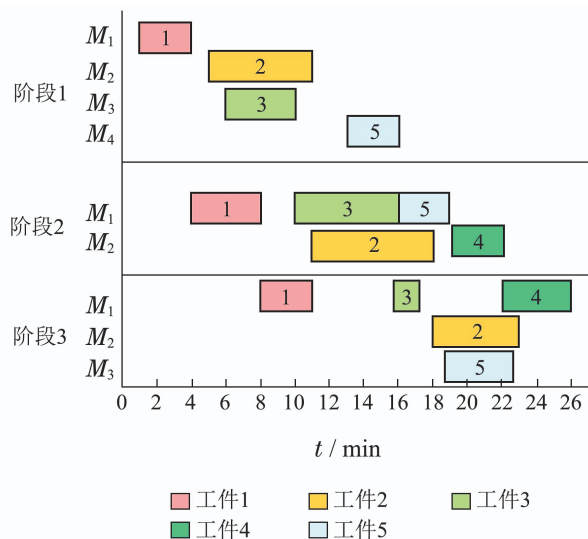


图3 无等待约束HFS示意图

Fig. 3 Chart of HFS with no-wait constraint

目前, 针对带有限等待时间约束 HFS 调度问题的主要文献共 20 篇, 如表 1 所示.

表 1 无等待约束 HFS 问题文献分析表

Table 1 Literature about the HFS with no-wait constraints

方法	问题	文献
启发式方法	$F_2(1, P_m) \text{nwt} C_{\max}$	[25]
改进的遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt} C_{\max}, \sum E_j$	[29]
启发式方法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prec}, \text{nwt} C_{\max}$	[40]
拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m M_j, \text{nwt} \sum w_i C_i$	[34]
约束规划方法	$FH k , (PM^{(j)})_{j=1}^K \text{nwt} C_{\max}$	[30]
离散粒子群算法	$F_m, P_{k=1}^m M_j, \text{nwt} C_{\max}$	[37]
离散粒子群算法	$F_m, P_{k=1}^m M_j, \text{nwt} C_{\max}$	[28]
遗传算法	$F_2(1, P_m) \text{nwt} C_{\max}$	[24]
粒子群优化算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt} C_{\max}$	[31]
混合粒子群-NEH算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prmu}, \text{nwt} C_{\max}$	[32]
改进的拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prmu}, r_j, \text{nwt} \sum w_j F_j$	[35]
分支界定方法	$F_2(1, P_m) \text{nwt} C_{\max}$	[22]
改进拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt} C_{\max}$	[36]
L型切面的求解算法	$F_2(1, P_m) \text{limit} - \text{wait} \text{cost}$	[26]
遗传算法+模拟退火算法	$F_2(1, P_m) \text{prmu}, \text{brkdown}, \text{nwt} C_{\max}$	[21]
模拟退火+人工免疫系统算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt} \sum w_j E_j$	[38]
两种混合整数线性规划模型	$F_2(PD_m, P_m) \text{nwt}, \text{limit} - \text{idle} C_{\max}$	[23]
人工免疫系统算法	$F_2(1, P_m) \text{prmu}, \text{nwt} C_{\max}$	[27]
元启发式方法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prmu}, \text{limit} - \text{wait} C_{\max}, \sum T_j, \sum F_j$	[116]
多项式时间逼近算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt} C_{\max}$	[33]

按照问题规模、求解算法、问题应用等进行分类如下.

1) 问题规模.

按照求解问题的规模, 求解有限等待时间约束 HFS 调度问题的文献可以划分为两阶段和多阶段问题.

文献分析可见,目前有7篇文献针对两阶段HFS-NW问题求解:

① 针对两阶段小规模问题:文[21]考虑工件数规模为3~10,并行机床数规模 ≤ 12 ,共计33个算例进行测试.文[22]测试了工件数规模为10~20,并行机床数规模为2~10,共计16个算例.文[23]生成并测试了工件数量10~30,并行机床数量为2~10的小规模算例.

② 针对两阶段大规模问题:文[24]构建了工件数规模为10~200,并行机床数规模为2~10,共计24个算例进行测试.文[25]则考虑了某一个阶段只有一台机床,测试算例规模中工件数范围为30~1100.文[26]考虑了工件数量20个,并行机床数量2~4个的小规模问题.文[27]考虑分别测试了工件数量为10/20/50的小规模算例和工件数量为100/250/500的大规模算例.上述针对两阶段HFS-NW文献基本采用确定性或启发式方法.

针对多阶段HFS-NW问题,按照算例规模划分:

① 小规模算例HFS-NW.文[28]考虑了工件数为6~100,3个加工阶段,并行机床数量 ≤ 20 ,共计20个问题进行试验测试.文[29]求解钢铁生产中炼钢-精炼-连铸-轧制4道工序,12个工件,每道工序3/3/2/2台并行机的问题.文[30]针对某钢厂调度问题,考虑了工件数为{15, 25, 35},阶段数2~4,加工机床数3~5,共计27个问题进行试验测试.文[31]针对高速磁浮列车调度,测试了19个分区,每个分区并行轨道数为1或2,列车数为10辆的算例.文[32]针对3种实例,12个工件,加工阶段数为3或4,并行机床数量为2或3的小规模算例进行测试.文[33]在OR算例库的基础上,生成并测试了工件数20/30,10个加工阶段,3台并行机床的HFS-NW问题.

② 大规模HFS-NW问题.文[34]针对工件数规模为20~100,阶段数和每阶段机器数为2~4的共计360个问题进行测试.文[35]针对工件数为20~100,阶段数2~4,加工机床数2~4,共计24个问题进行试验测试.文[36]在工件数为40~100,阶段数2~4,加工机床数3/4,共计24个算例开展测试.

2) 求解算法.

在求解算法方面,目前求解HFS-NW问题主要包括确定性算法、启发式方法、元启发式方法等.其中确定性算法包括CPLEX对模型MIP求解、基于约束规则的策略^[30]、拉格朗日松弛算法^[34-36]、L型切面法^[26]等.

针对HFS-NW的启发式策略主要包括Johnson方法、改进Johnson方法、最长加工时间(longest processing time, LPT)、大-小规则(large-small rule, LSR)、大-中规则(large-medium rule, LMR)、最小偏差(least deviation, LD)、改进的Gilmore and Gomory、贪心启

发式^[25]等策略.

求解HFS-NW问题的元启发式方法主要包括遗传算法(genetic algorithm, GA)^[24]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[28,33,37]、人工免疫算法(artificial immune system, IAIS)^[27]等.

近年来,算法混合在一定程度上可以形成算法优势互补,从而提升算法求解能力.针对HFS-NW问题,算法混合主要包括:

① 元启发式方法和启发式规则相结合方面:文[24]采用遗传算法,并结合包括Johnson方法、改进Johnson方法、LPT、LSR、LMR、LD等在内的6种启发式规则.进一步,文[22]融合上述6种启发式策略和改进的Gilmore and Gomory策略,并结合分支定界提出了一种混合算法.文[31]针对HFS-NW问题特点,设计了一种插入—平移启发式方法,融合工件冲突判断和化解策略,设计了一种混合粒子群算法.文[32]构建了一种粒子群和Nawaz-Enscore-Ham(NEH)启发式规则相结合的混合算法.

② 多种元启发式混合:典型的包括人工免疫和模拟退火混合^[38]、遗传算法和模拟退火混合^[21]、遗传算法和帝国竞争混合^[39]等.

分析上述求解算法可见,在求解HFS-NW问题上,以拉格朗日算法为代表的确定性算法得到了验证,元启发式算法层出不穷,而算法混合已成为近年来求解该类问题的主要算法.

3) 应用领域.

针对实际生产过程中存在的HFS-NW问题:文[29]针对钢铁生产中的冶铸轧一体化调度问题,建模为一类不可中断的、无等待HFS问题,即 $FF_s | m_1, m_2, \dots, m_r | \sum C_i$.文[40]针对某钢铁公司冷轧厂热处理车间冷卷热处理生成调度中的问题,建立了一类以热罩和冷罩为机床,冷卷为工件的一类无等待HFS,结合问题特性,给出了基于参数排序和值排序的启发式规则策略,以最小化 $C_{\max}$.轩华等^[34]针对炼钢生产中炼钢、精炼、连铸3个加工阶段中存在的无等待HFS问题,建立了整数规划模型,以最小化总加权完工时间 $\sum w_j C_j$ 为目标,采用拉格朗日松弛算法进行求解.文[28,37]针对钢铁企业的轧辊热处理调度问题,研究了两阶段及三阶段无等待混合流水车间调度问题,设计了分阶段实现的无等待算法,结合离散粒子群优化算法对建立的整数规划模型进行优化求解,以最小化 $C_{\max}$.张其亮等^[31]针对高速磁浮列车调度过程中存在的双向无等待混合流水车间调度问题,设计了一种粒子群优化算法,针对无等待约束,提出工件冲突的检测和化解方法,解码过程利用处理时间最短优先策略选择加工机器.文[26]针对半导体后端封装车间中带有瓶颈工序的调度问题开展研究.

分析上述关于有限等待约束HFS调度问题的相关文献可见:

① 在问题规模方面, 目前求解HFS-NW问题主要分为小、中、大3种规模, 最大规模问题中工件数量 ≤ 500 , 加工阶段数量一般 ≤ 4 ;

② 求解算法方面, 精确算法包括分支定界、拉格朗日等在小规模问题中得到了验证, 遗传算法、粒子群优化等在内的元启发算法在求解大规模问题中可以在一定程度上避免组合爆炸问题, 而包括元启发式和启发规则的混合、元启发式和精确算法混合等在内的混合算法在近年来得到了深入研究;

③ 应用领域方面, 由于实际生产过程, 譬如炼钢过程、高速磁浮列车调度等过程中, 工艺特殊性要求工件在加工或调度过程有限等待或无等待. 因而, HFS-NW问题存在于大量实际生产过程中, 亟待有效算法.

4 带准备时间HFS调度问题

现实生产过程中, 由于工艺约束, 机床上不同工件之间需要进行特定的准备工作, 譬如, 纺织工业中染布工艺, 不同颜色的布料加工间隙, 需要对设备进行清洗. 因而, 工件准备时间得到了广泛关注和研究.

图4给出了带准备时间约束的HFS (HFS with setup time, HFS-ST)示意图.

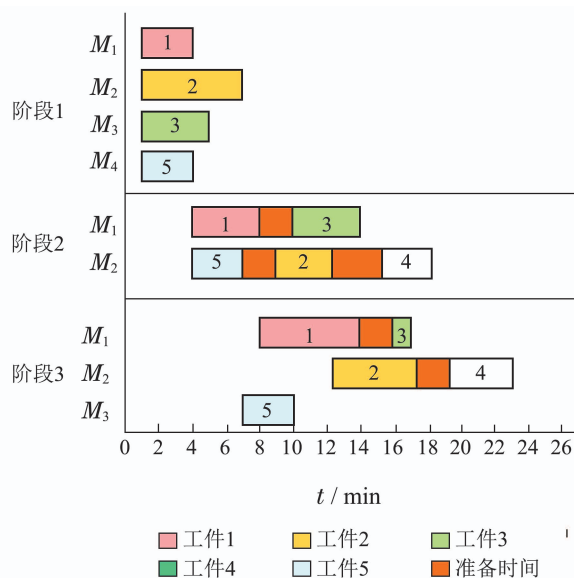


图4 带准备时间约束HFS示意图

Fig. 4 Chart of HFS with setup time constraint

表2列出了近年来HFS-ST问题相关文献.

表2 带准备时间的HFS调度问题文献分析表

Table 2 Literature about HFS with setup time constraints

方法	问题	文献
多项式优化算法	$F_2(1, P_m) s_{jk} C_{\max}$	[43]
元启发式算法	$F_2(1, P_m) s_{jk} C_{\max}$	[41]
启发式方法	$F_2(1, 4) s_{jk} w_j L_{\max}$	[42]
免疫算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[46]
元启发式算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[58]
变邻域搜索算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, PM C_{\max}$	[45]
免疫算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, brkdwn C_{\max}$	[47]
遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, brkdwn C_{\max}$	[48]
蚁群算法+模拟退火算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} \sum T_j, \sum E_j$	[49]
模拟退火算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[50]
随机键遗传算法	$F_2, P_{k=1}^m s_{jk}, recrc C_{\max}$	[44]
水流算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}, \sum w_j T_j$	[52]
遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[53]
免疫算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, lag C_{\max}$	[51]
遗传算法+启发式策略	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[55]
多目标遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, uncertainduedates C_{\max}, \sum T_j$	[59]
主动调度方法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[56]
局部搜索+元启发式方法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}$	[57]
多目标优化算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} C_{\max}, TEC$	[54]
HSSA+OBWOA+DGWO	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk} \sum w_j E_j, \sum w_j T_j$	[111]

由表可见, 当前研究该类问题的文献有20篇, 以下按照问题规模、求解算法、应用领域3个方面对上述文献进行分类分析.

1) 问题规模.

按照求解问题的规模, 求解HFS-ST调度问题的文献可以划分为两阶段和多阶段问题.

针对两阶段HFS-ST问题,在测试小规模算例方面,文[41]测试了800个算例,工件数规模为{2, 5, 15}. 文[42]测试了工件数量为7~10的164个来自实际标签纸生产数据形成的算例. 在两阶段HFS-ST大规模问题中,文[43]考虑工件数从5到100的760个算例. 文[44]参照经典算例生成了1215个算例,工件规模为{30, 70, 100},加工机器规模为{1, 2, 4}.

针对加工阶段数量在2~8的中等规模HFS-ST问题,文[45]随机生成了工件数在40~100范围的2430个算例,文[46]测试了工件数在6~100范围的252个算例. 文[47~50]参照经典算例生成了工件数分为{6, 30, 100}3种的小、中、大规模共计500个算例. 文[51]生成了240个算例,工件规模为3~100,加工机床数量为1~10. 文[52]考虑了工件规模20~100,机床规模1~8多类型算例. 文[53]随机生成了240个算例,工件数分为{20, 50},机器数1~3. 文[54]针对HFS,参照经典算例进行扩展,考虑了工件数范围为10~200的不同规模算例.

针对加工阶段数量达到或超过10个的大规模HFS-ST问题,文[55~56]随机生成了最多12个加工阶段的算例,工件数分为{50, 100, 200}3种. 文[57]测试了随机生成的60个算例,其中工件数范围为20~100,每个阶段的机器数量为1~5.

另外,文[58]测试并形成了3类Benchmark算例. 第1类算例中每个阶段的机器数为{1, 2, 3},第2类算例中每个阶段的机器数为2,第3类算例中每个阶段的机器数为3. 每一类算例中工件数分为{20, 50, 100, 200},加工阶段分为{5, 10, 20},共计1100个算例. 上述算例可以在网站(<http://soa.iti.es/r Ruiz>)下载并对比测试.

2) 求解算法.

在求解算法方面,目前求解HFS-ST问题主要包括确定性算法、启发式方法、元启发式方法、算法混合等.

启发式方法方面,文[42]融合了LPT, SPT等一些启发式方法,设计了9种不同调度规则的启发式策略;文[43]综合了Sule规则, S&G (Szwarc and Gupta, 1987) 策略、LPT等多种启发式方法.

元启发式方法主要包括变邻域搜索^[45]、人工免疫算法^[47, 51]、遗传算法^[48, 55, 58~59]、水流算法(water flow like algorithm, WFA)^[52]、果蝇优化(fruit-fly optimization algorithm, FOA)^[57]等.

算法混合主要包括:

① 元启发方法与启发式规则相结合方面: 文[46]融合 Johnson 策略、最短处理时间循环规则(shortest

processing time cyclic heuristic, SPTCH) 和流经时间多点插入启发规则(flow time multiple insertion heuristic, FTMIH),并结合免疫算法设计了一种混合方法;文[50]融合了模拟退火算法和SPTCH规则;文[44]基于随机键遗传算法,采用SPT和NEH启发式策略初始化种群;Luo等^[55]针对工件按照机床设置和工具不同分类的HFS问题,提出了元启发式算法和启发式规则相结合的混合算法.

② 多种元启发式混合: 文[49]构造了一种多元启发式的混合算法,利用了人工蚁群算法初始化种群,以模拟退火算法作为进化算法和变邻域搜索算法进行局部搜索;文[53]融合了遗传算法和多智能体方法;Pan等^[57]提出了6种局部搜索方法和3种基于群的元启发式方法,包括改进的果蝇优化、迁徙鸟群优化和离散人工蜂群优化,并给出了一种协同优化策略.

3) 问题应用.

针对实际生产过程中存在的带准备时间约束HFS问题: 文[42]针对实际标签纸生产过程的调度问题开展了应用研究. Luo等^[56]为实际生产问题提出了一种主动调度方法. Mirsanei等^[50]针对化工、纺织、印刷板等生产过程中存在的准备时间约束HFS调度问题,以最小化 C_{max} 为目标,提出了一种改进的模拟退火算法. Hekmatfar等^[44]针对在半导体、电器制造、飞机引擎、石油化工等生产过程中的两阶段可重入HFS问题,考虑准备时间约束,以最小化Makespan为目标,设计了一种随机键遗传算法. Pargar等^[52]综合考虑人力在工件准备时间中的学习效应,以最小化总加权Makespan和总滞后时间为目标,提出了一种水流算法.

分析上述关于带准备时间约束HFS调度问题的相关文献可见:

① 在问题规模方面,目前求解HFS-ST最大规模问题中工件数量 ≤ 200 ,加工阶段数量一般 ≤ 12 ;

② 求解算法方面,多种算法混合,特别是元启发方法与启发式规则结合,以及多种元启发式方法混合,逐渐体现了性能优势. 然而,上述文献在问题特征分析、问题骨架设计、模型变量关系挖掘等方面,尚未形成系统的理论成果.

③ 应用领域方面, HFS-ST主要存在于标签纸生产、化工、纺织、印刷板、半导体、电器制造、飞机引擎、石油化工等生产过程中,结合问题特征,发掘更多实际应用价值,值得深入研究.

5 模糊或不确定加工时间HFS调度问题

模糊/随机加工时间约束是不确定环境下调度问题中最常见的工艺约束之一,目前得到了广泛关注和研究. 图5给出了模糊加工时间HFS (HFS with fuzzy

time, HFS-FT)示意图。

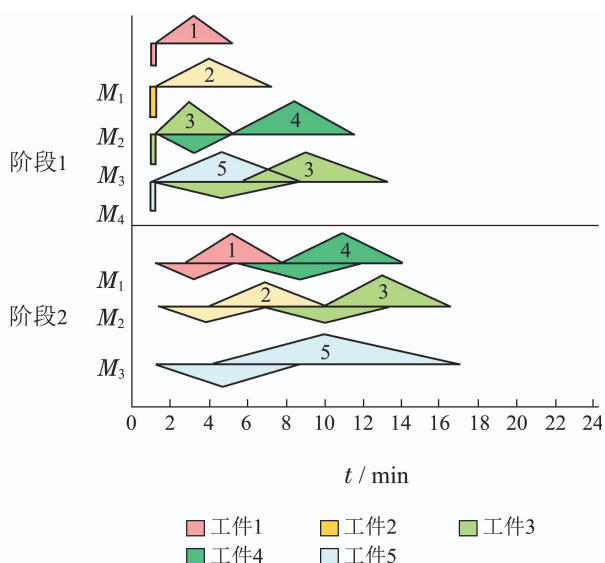


图 5 模糊加工时间HFS示意图

Fig. 5 Chart of HFS with fuzzy or stochastic processing time

1) 问题规模.

针对加工阶段数量 ≤ 5 , 或工件数量 ≤ 50 的中小规模HFS-FT问题: 文[22]参照经典算例生成了11个算例, 其中工件数分为10~100, 加工阶段为{2, 5}. 文[71]随机生成了360个算例, 其中工件数分为20~40, 加工阶段为{6, 10, 15}. 文[72]随机生成了27个算例, 其中工件数分为20~40, 加工阶段为4~12. 文[60]随机生成了30个算例, 其中工件数设置为5~20, 加工阶段为2~7. 文[61]随机生成了27个算例, 其中工件数分为3~50, 加工阶段为2~8. 上述文献问题规模中并行机床的数量为1~4之间.

针对加工阶段 ≤ 8 的中等规模HFS-FT问题: 文[62]随机生成了252个算例, 其中工件数分为{6, 30, 100}, 加工机器数量分为恒定的2~8和动态的{1~4, 1~10}. 文[63]参照经典算例生成了9个算例, 其中工件数分为{6, 30, 100}, 加工机器数量设置为动态的1~5. 文[64]参照经典算例生成了90个算例, 其中工件数分为{50, 150}, 加工机器数量分为10~50. 文[65]参照经典算例生成了9个算例, 其中工件数分为{6, 30, 100}, 加工机器数量设置为动态的1~5. 文[66]参照经典算例生成了1350个算例, 其中工件数分为20~100, 加工机器数量为2~6.

针对加工阶段数 ≥ 10 的大规模HFS-FT问题: 文[67]随机生成了27个算例, 工件数设置为20~60, 加工机器数量设置为5~25. 文[68]随机生成了300个算例, 工件数分为15~200, 加工阶段最大数量设定为30, 加工机器数量分为3~20. 文[69]参照经典算例生成了90个算例, 其中工件数分为20~100, 加工机器数量为

动态5~20.

上述关于HFS-FT文献问题规模分析, 目前所测试的算例基本以中小规模为主, 且多数论文采用随机生成算例的方式, 尚缺乏通用的经典Benchmark算例.

2) 求解算法.

元启发式方法方面. Wang等^[70]针对随机加工时间约束的HFS调度问题, 提出了一种基于排序策略的分布估计算法. Qin等^[65]针对动态HFS中不确定加工时间问题, 融合滚动优化策略, 提出了一种蚁群优化方法. 张洁等^[63]针对加工时间不确定的HFS问题, 提出一种基于滚动窗口的改进蚁群算法. Golneshini等^[61]提出了一种基于分类的进化算法. González-Neira等^[64]针对随机柔性流水车间, 建立了混合整数规划模型, 并提出了一种基于仿真的优化算法.

算法混合主要包括: ① 元启发式和启发式规则相结合方面: Choi等^[71]针对加工时间随机的HFS问题, 结合SPT启发式规则和遗传算法. Zare等^[68]针对交货期和加工时间是三角模糊数的柔性流水车间问题, 融合数据挖掘技术, 提出了一种遗传算法和属性演绎相结合的方法. ② 多种元启发式方法混合方面: Zheng等^[66]针对不确定环境及分布式制造模式下的HFS问题, 考虑模糊加工时间和模糊交货期, 以最小化总模糊拖后时间和最大化鲁棒性为目标, 融合分布估计和迭代贪心算法, 提出了融合问题特征的协同进化算法. 基于信息熵和精英解多样性的协同策略有效平衡了算法的搜索和挖掘能力. Behnamian等^[62]设计了一种遗传算法和变邻域搜索相混合的算法. Wang等^[72]针对随机加工时间HFS问题, 采用BP神经网络技术识别优质个体, 融合模拟退火中的选择策略, 提出了一种两阶段分布估计算法. Ahonen等^[60]针对在下料问题中存在的机床次序相关的加工时间约束HFS问题, 给出了一种融合模拟退火和禁忌搜索的混合启发式方法.

3) 问题应用.

带模糊/随机加工时间约束的HFS问题在下料问题^[60]、PCB制造企业生产流程^[63]、PCB装配流水线^[65]等实际生产中得到了应用研究. 然而, 相对于其他类型时间约束问题, HFS-FT问题在实际生产过程中尚未得到广泛而深入的研究.

分析上述关于带模糊/随机加工时间约束HFS调度问题的相关文献可见: ① 在问题规模方面, 目前求解HFS-FT最大规模问题中工件数量 ≤ 200 , 加工阶段数量一般 ≤ 30 ; ② 求解算法方面, 多种算法混合依然是求解该类问题的先进算法. 然而, 上述成果或者缺乏对问题建模中变量协同进化的分析, 或者缺乏全局/局部搜索能力的平衡, 或者不能用于求解大规模优化问题; ③ 应用领域方面, 不确定加工时间是一类动态环

境下的特殊工艺约束问题,问题的特征提取、模型中的变量关联关系、约束特性分析等方面,虽然取得了

一定的成果,但还缺乏系统性.带模糊或不确定时间约束HFS问题文献分析见表3.

表3 带模糊或不确定时间约束HFS问题文献分析

Table 3 Literature about HFS with fuzzy or uncertain constraints

方法	问题	文献
遗传算法+归因策略	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{fuzzy}} \tilde{T}_{\max}$	[68]
遗传算法+变邻域搜索	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{depend}} C_{\max}, \text{rac}$	[62]
SPT+遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{stochastic}} \tilde{C}_{\max}$	[71]
基于两阶段模拟的EDA方法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{stochastic}} \tilde{C}_{\max}$	[72]
滚动调度策略+蚁群算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{uncertain}} \delta_{\max}$	[63]
基于顺序的分布算法估计	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{stochastic}} \tilde{T}_{\max}$	[64]
模拟退火+禁忌搜索	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{recirculation}}, p_{\text{depend}} C_{\max}$	[60]
基于滚动重调度策略的蚁群算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{uncertain}}, p_{\text{unrelated}} \sum \tilde{T}_j$	[65]
聚类+遗传算法+粒子群算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{fuzzy}} \sum C_j, \tilde{T}_{\max}$	[61]
节能多目标调度算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{dependent}}, p_{\text{unrelated}} \sum P_i, \sum_{k=1}^m Ep_k$	[67]
模糊多目标局部搜索算法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{fuzzy}}, \text{prmu} \tilde{C}_{\max}, \sum \tilde{F}_j$	[69]
分布算法+迭代贪心搜索法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{fuzzy}} \sum \sum \tilde{p}_{i,j}, \tilde{d}_j$	[66]

6 多时间约束HFS调度问题

本节主要分析多种时间约束混合的HFS(HFS with multiple time-related constraints, HFS-MT)问题.

1) 准备时间与无等待约束混合.

针对带有准备时间和无等待时间约束相混合的HFS问题:文[73]融合模拟退火和帝国竞争两种算法,设计了一种混合优化算法.文[39]针对两阶段柔性流水线车间,提出了一种结合自适应帝国竞争算法和遗传算法的混合算法.文[74]设计了一种NSGA-II和变邻域搜索的混合方法,以最小化Makespan和总平均滞后时间为目标.文[75]针对不相关平行机的柔性流水车间,提出了一种融合帝国竞争、模拟退火、变邻域搜索和遗传策略的混合算法.进一步,文[76]综合机床可用性、准备时间、工件释放时间、无等待等约束,设计了一种生物地理优化(biogeography-based optimization)算法.文[77]等针对多平行机的柔性流水车间,融合杂草优化(invasive weed optimization, IWO)、变邻域搜索和模拟退火,设计了一种混合优化算法. Attar等^[78]针对带有限等待时间、不相关并行机、次序相关准备时间等约束,构建了一种多目标粒子群优化.文[79]融合3种启发式规则,构建了一种分支定界算法和禁忌搜索混合的优化算法.文[80]提出了一种基于模型的启发式算法,并结合遗传算法设计了一种混合算法.

2) 准备时间与有限缓冲区约束混合.

文[81]针对电视装配线中存在的带有不相关机床、次序相关准备时间、机床可用、有限缓冲区等约

束的HFS问题,设计了一种有效的遗传算法. Rashidi等^[82]针对带两种约束的不相关平行机HFS问题,提出了一类种群划分的遗传算法.文[83]以最小化 $C_{\max}$ 和 $\sum T_j$ 为目标,设计了一种融合非支配排序和子种群划分的遗传算法.文[84]提出了一种结合Metropolis抽样准则和变邻域搜索的混合量子粒子群优化算法.文[85]针对集装箱码头作业调度问题,融合7种启发式规则和遗传算法.

3) 准备时间与运输时间相结合.

Naderi等^[45]综合考虑准备时间和运输时间,以最小化总完工时间和总拖后时间为目标,提出了一种模拟退火算法.文[86]针对炼钢连铸生产流程中带有准备时间、工件释放时间和运输时间约束的HFS问题,设计了一种离散人工蜂群算法.文[87]针对炼钢连铸生产流程,研究了带有准备时间和运输时间约束的HFS问题,并设计了拉格朗日算法.文[88]设计了一种遗传算法和启发式策略相结合的混合算法.文[89]针对紧急订单插单重调度HFS问题,综合考虑工件批量、刀具换装时间、运输能力等约束,融合基于事件驱动的重调度策略和重排插单策略,构建了一种多目标优化算法.文[90]针对炼钢连铸流程,研究了带有准备时间和运输时间约束的HFS问题,并给出了基于拉格朗日的确定性算法.文[91]针对炼钢连铸过程中存在的跳跃工序问题,考虑运输时间和准备时间约束,设计了一种遗传算法.文[92]针对炼钢流程中存在的运输时间、准备时间等约束的HFS问题,提出了一种基于分解的多目标优化算法.文[93]设计了一种模因

算法。

4) 准备时间与其他约束混合。

Fattahi等^[94]针对带有准备时间和装配线约束的HFS问题,以最小化Makespan为目标,提出了一种分支定界算法。文[95]针对可重入调度问题,考虑学习效应和准备时间约束,设计了一种双目标优化算法。

5) 无等待约束混合。

Gicquel等^[96]针对4个加工阶段的化工生产过程,综合考虑批处理、无等待、有限缓冲区3种约束条件,设计了一种切割平面算法(cut-plane algorithm, CPA)。Attar等^[97]针对不相关平行机HFS问题,考虑有限等待时间、工件释放时间约束,提出了一种生物地理优化算法。文[98]针对无等待和有限缓冲区两种约束的HFS,构建了启发式规则与禁忌搜索相融合的混合算法。文[99]针对船舶分段涂装中存在的有限等待和运输时间约束HFS问题,设计了混合多种启发式规则的差分进化算法。

6) 模糊或不确定时间与有限缓冲区混合。

文[100]针对炼钢企业生产存在的带有限缓冲区的随机柔性流水车间调度问题,提出了一种变邻域搜索算法。Mollaei等^[101]针对不确定加工环境下,综合考虑准备时间和有限缓冲区约束,在加工时间,次序相关准备时间和成本都不确定的情况下,融合了一种鲁棒可行规划方法(robust possibilistic programming, RPP)。

7) 运输时间约束混合。

Elmi等^[102]综合考虑有限缓冲区、机器人运输、机床可用性、不相关平行机等约束条件,以最小化Makespan为目标,结合问题特征设计了新的邻域策略,并提出了一种模拟退火算法。文[103]进一步综合考虑了阻塞和机器人运输约束,并设计了模拟退火算法。文[104]针对北京某锻造公司的环锻流程,综合考虑了工件释放时间和运输时间约束,建立了最小化Makespan和能耗目标的问题模型。文[3, 105–107]采用拉格朗日松弛算法求解了带有运输时间和工件释放时间约束的HFS问题。文[108]针对带运输约束的HFS问题,提出了一种快速启发式算法。文[109]针对带有运输时间、阻塞约束的HFS问题,设计了两种元启发式方法。文[110]设计了一种分支定界确定性算法。

8) 工件释放时间约束混合。

文[112]综合考虑不相关平行机、机床可用、工件释放时间和有限缓冲区约束,建立了混合整数规划模型,采用启发式和元启发式策略,设计了一种模拟退火算法。文[113]针对带工件释放时间和阻塞约束的HFS,融合拉格朗日松弛算法,构建了一种双重迭代的改进型生成算法。Lin^[114]综合考虑库存对调度问题的影响,以最小化 $C_{\max}$ 和 $\sum F_j/n$ 为目标,设计了一种和声搜索和遗传算法相结合的混合方法。Zohali

等^[115]建立了两类混合整数规划模型,以最小化存储和启动成本为目标,设计了一种离散果蝇优化方法。

分析上述关于多约束HFS调度问题的相关文献,实际生产过程往往存在诸多约束条件,因此,多时间约束HFS问题必将成为研究的热点。当前文献在该类问题虽然取得了一定的研究成果,但围绕各类约束条件之间的关联关系分析、不同约束和目标映射关系、变量和约束演绎推理等方面研究成果不多,亟待开展深入研究。多时间约束HFS文献见表4。

7 多目标时间约束HFS问题

本节针对时间约束HFS相关多目标优化问题进行分析,主要围绕时间相关、能耗相关、成本相关等3大类目标进行归类分析。

1) 与交货期指标相关的多目标优化。

综合考虑带有交货期时间,优化提前/滞后时间指标的多目标文献有:针对HFS–NW问题,主要有模拟退火+人工免疫算法^[38]、元启发式方法^[116]等。针对HFS–ST问题,主要有启发式方法^[42]、蚁群优化+模拟退火^[49]、水流算法^[52]、多目标遗传算法^[59]、松鼠搜索算法(hybrid squirrel search algorithm, HSSA)+鲸鱼群算法(opposition based whale optimization algorithm, OBWOA)+灰狼优化算法(discrete grey wolf optimization(DGWO))^[111]等。针对HFS–FT问题,主要有遗传+归因策略^[68]、分布式估计算法^[64]、蚁群算法^[65]、遗传+粒子群+聚类^[61]、迭代贪心算法^[66]等。针对多时间约束HFS问题,主要成果包括:遗传算法^[82–83, 91]、分支定界法^[96]、人工蜂群^[86]、拉格朗日方法^[87]、遗传+变邻域搜索^[74]、元启发式方法^[78]、粒子群算法^[117]等。

2) 带有能耗指标的多目标优化。

文[54]以最小化Makespan和总能耗为目标,求解HFS–ST问题。文[67]以最小化总加权传递惩罚与总能耗为目标,求解HFS–FT问题。文[92]针对炼钢流程,提出了能耗感知的多目标算法。文[104]建立了最小化Makespan和能耗目标的问题模型。

3) 带有成本指标的多目标优化。

随着全球经济的发展,各类成本最小化必将成为工业生产的重要目标。当前研究成果中,带有成本指标较少,主要有:文[62]以最小化Makespan和资源分配成本为目标,求解HFS–FT问题。文[64]以最小化最大滞后时间和客户对公司的重要性为目标,求解HFS–FT问题。文[101]以最小化Makespan和机器分配总成本为目标,求解HFS–MT问题。

8 展望

纵观混合流水车间调度的研究现状可见,时间约束的HFS问题已成为诸多领域的研究热点,但许多工作仍有待深入研究与拓展。下面就问题、算法和应用等层面给予展望。

表 4 多时间约束HFS文献分析表

Table 4 Literature about HFS with multiple time constraints

方 法	问 题	文献
拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{size}_{i,j}, \text{prec}, \text{brkdwn}, tt, M_j, r_j \sum w_j C_j$	[106]
遗传算法	$F_m, R_{k=1}^m s_{jk}, M_j, tt C_{\max}$	[81]
遗传算法	$F_m, R_{k=1}^m s_{jk}, \text{block} C_{\max}, T_{\max}$	[82]
子群体遗传算法+非支配排序遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, \text{block} C_{\max}, T_{\max}$	[83]
混合元启发式算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}$	[73]
分支定界算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, \text{limit} - \text{wait} \sum w_j T_j$	[96]
人工蜂群算法	$F_m, Q_{k=1}^m tt, r_j, s_{jk} T_{\max}, E_{\max}, \bar{S}o$	[86]
启发式规则+遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, s_{jk} C_{\max}$	[85]
元启发式优化方法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, \text{jinst} ev_{\text{mbc}}$	[100]
帝国竞争算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}$	[39]
拉格朗日松弛算法	$F_2, (1, P_m) tt, s_{jk}, M_j, r_j \sum w_j C_j$	[105]
拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prec}, tt, M_j, r_j \sum w_j C_j$	[107]
模拟退火算法	$F_m, (1, R_2) \text{block}, \text{brkdwn}, tt C_{\max}$	[102]
元启发式算法	$F_m, R_{k=1}^m M_j, \text{limit} - \text{wait} C_{\max}$	[97]
快速启发式算法	$F_2, (1, P_m) tt \sum C_j$	[108]
模拟退火算法	$F_m, P_{k=1}^m tt, M_j, \text{block} C_{\max}$	[103]
拉格朗日算法	$F_m, P_{k=1}^m tt, s_{jk} T_{\max}, E_{\max}, \bar{S}o$	[87]
粒子群优化算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{recrc}, s_{jk}, \text{prec} C_{\max}$	[84]
非支配排序遗传算法+变邻域搜索算法	$F_m, p_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}, \bar{T}$	[74]
元启发式算法	$F_m, R_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}$	[75]
元启发式方法	$F_m, R_{k=1}^m \text{limit} - \text{wait}, s_{jk}, M_j C_{\max}, \sum \omega_j T_j$	[78]
分支定界算法	$F_m, P_{k=1}^m s_{jk}, \text{block} C_{\max}$	[94]
元启发式方法	$F_m, Q_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}$	[77]
启发式算法+元启发式算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, M_j CT$	[112]
禁忌搜索算法	$F_m, R_{k=1}^m \text{nwt}, \text{block} C_{\max}$	[98]
混合微粒群优化算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{batch}, \text{nwt}, r_j \sum \omega_j T_j, \sum \omega_j C_j$	[117]
拉格朗日算法	$F_m, P_{k=1}^m tt, s_{jk}, M_j \sum w_j C_j, \sum w_j \bar{S}o_j$	[90]
拉格朗日算法	$F_2, P_{k=1}^m tt, \text{limit} - \text{wait}, s_{jk} C_{\max}$	[99]
两种元启发式算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, r_j, tt C_{\max}$	[109]
改进型列生成算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, s_{jk} C_{\max}$	[113]
基于生物地理的优化算法	$F_m, R_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk}, M_j C_{\max}$	[76]
元启发式算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{no} - \text{idle}, \text{prec} C_{\max}$	[118]
遗传算法+构造型启发式算法	$F_m, Q_{k=1}^m \text{recrc}, r_j, tt C_{\max}, \sum \omega_j C_j$	[88]
遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m tt, s_{jk} C_{\max}, \sum_{k=1}^m w_k T w_k, \sum w_j T_j$	[91]
分支定界算法	$F_2, (P_{m1}, P_{m2}) tt C_{\max}$	[110]
拉格朗日松弛算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{prec}, tt, M_j, r_j \sum w_j C_j$	[3]
鲁棒可能性规划方法	$F_m, P_{k=1}^m p_{\text{fuzzy}}, s_{jk}, \text{block} C_{\max}, \text{mac}$	[101]
离散果蝇算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, s_{jk}, \text{prmu} TC$	[115]
启发式算法+遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{limit} - \text{wait}, s_{jk} C_{\max}$	[80]
禁忌搜索方法+三种启发式方法	$F_m, Q_{k=1}^m \text{nwt}, s_{jk} C_{\max}$	[79]
非支配带精英策略的遗传算法	$F_m, R_{k=1}^m s_{jk}, \text{recrc}, \text{block}, tt C_{\max}$	[89]
基于分解的三阶段多目标方法	$F_m, P_{k=1}^m tt, s_{jk}, \text{block} C_{\max}, \text{TEC}$	[92]
混合和声搜索+遗传算法	$F_m, P_{k=1}^m \text{block}, \text{recrc} C_{\max}, \bar{F}$	[114]
进化算法	$F_m, P_{k=1}^m tt, r_j, \text{eRT} C_{\max}, \sum_{k=1}^m E p_k$	[104]
模因算法	$F_m, P_{k=1}^m r_j, s_{jk}, tt C_{\max}$	[93]

8.1 问题层面

1) 存在的问题.

HFS问题是典型的NP难问题, 目前对于经典的HFS问题已有诸多文献开展研究. 但实际工业生产中往往存在大量约束条件, 而目前诸多研究都假设不考虑这些实际约束. 虽然, 目前已有一些成果开展了针对带有限等待、准备时间、模糊/随机加工时间、多时间约束HFS问题的研究, 但针对实际生产中的时间约束的HFS问题的文献还不是非常系统. 图6给出了当前针对时间约束HFS问题文献分类图, 由图可见, 相比单独某一种时间约束, 多时间约束HFS得到了广泛研究, 在多时间约束HFS问题中, 考虑带准备时间约束与其他类型约束混合的文献占了较大比重. 针对其他类型多时间约束HFS尚需开展深入研究. 另外, 零空闲时间约束HFS问题缺乏足够的文献和有效的算法, 目前仅有Yazdani等^[118]等少数文献涉及该类问题.

另外, 经典Benchmark算例太少, 特别缺少针对某些类型时间约束HFS问题的Benchmark. 目前, 可以下载的主要有两类: 1) <http://www.prd.usp.br/docentes/debora/>^[83]; 2) <http://soa.iti.es/r Ruiz/>^[58].

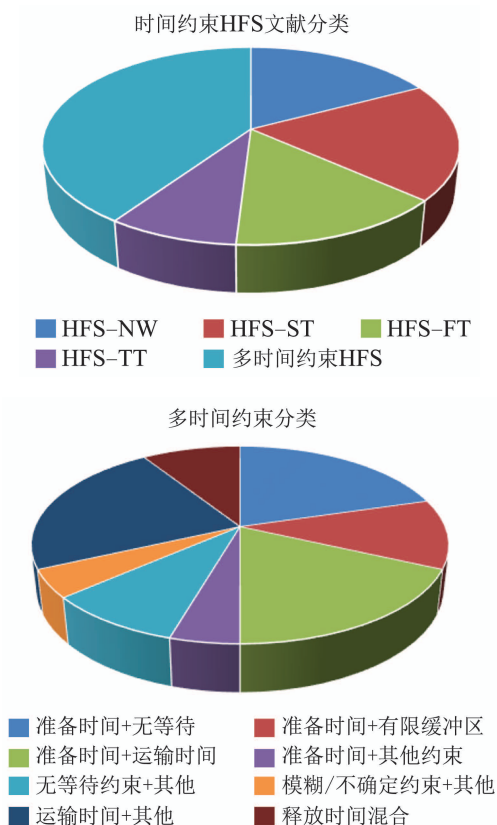


图 6 时间约束HFS问题分类示意图

Fig. 6 Classification of the time-constrained HFS

2) 未来研究的方向.

一方面, 针对特定工艺约束的HFS问题, 围绕问题分类、问题特征提取、问题建模、变量关联关系、约束划分、目标归类与转化等方面亟待深入开展研究. 另

一方面, 生成通用的经典Benchmark算例也是未来研究方向之一. 特别地, 针对多时间约束的HFS问题, 目前主要围绕静态条件下的约束优化, 尚缺乏动态不确定环境下. 针对多约束问题, 开展约束优化、问题特征提取、问题建模等工作, 无疑将有助于推动HFS理论与方法的发展.

8.2 算法层面

当前, 针对多时间约束的HFS问题, 求解算法层出不穷, 各类算法主要围绕如何提升全局搜索、局部搜索、平衡全局和局部搜索方面做了诸多工作.

1) 提升全局搜索能力方面.

Moradinasab等^[39]改进了帝国竞争算法, 加入全局战争(global war)避免早熟收敛. Abdollahpour等^[38]设计了基于云理论的模拟退火算法, 可以保持搜索的多样性. 一些算法采用和模拟退火相结合的方式^[21, 49, 60, 73, 102], 一定程度上提升了算法全局搜索能力, 张洁等^[63]通过在蚁群算法中适当刺激蚂蚁尝试具有较弱信息素路径, 提高所得解的全局性. Chung等^[27]设计了两种基于免疫球蛋白的人工免疫系统算法, 以避免陷入局部最优. Santosa等^[33]通过在离散粒子群优化算法中引入新的更新机制, 以跳出局部最优. 文^[82]在遗传算法中提出了Redirect过程来克服过早收敛.

2) 提升局部搜索能力方面.

Pan等^[57]设计了迭代局部搜索、迭代贪心算法, 采用了混合局部搜索、可变邻域搜索、混合参考局部搜索来提高搜索能力. 文^[94]使用了贪心随机自适应搜索方法.

3) 在全局搜索和局部搜索平衡方面.

Zheng等^[66]融合分布估计和迭代贪心算法, 基于信息熵和精英解多样性的协同策略有效平衡了算法的搜索和挖掘能力. Zhang等^[32]提出了一种混合粒子群-NEH算法, 利用粒子群优化算法解决机器分配问题, 并进行全局优化. 通过不断对停滞粒子实行变异操作, 避免粒子群陷入早熟收敛状态. 一些文献通过融合变邻域搜索方法, 提升全局搜索和局部搜索的平衡^[68, 75, 77, 84, 100, 111, 118]. 一些文献则通过多种元启发式方法混合, 譬如粒子群优化和遗传算法混合^[61]、分布算法和迭代贪心搜索相结合^[66]、遗传算法与和声搜索相结合^[114].

分析上述文献可见, 多约束下的混合流水车间调度的复杂性远大于传统的流水车间调度问题, 目前的算法可分为确定性算法、启发式方法、元启发式方法、混合算法等几种, 算法混合在近年来表现了较为良好的性能. 但限于问题的复杂性, 研究上述算法混合机制、参数自适应调整、权衡全局搜索和局部搜索, 结合问题领域知识设计启发式规则等缺乏系统的理

论成果,特别需要开展深入的研究。

另一方面,大数据技术突飞猛进,也为优化算法带来了契机,目前相关成果较少,典型的包括融合BP神经网络的应用^[72]、融合数据挖掘技术的应用^[68]等,但相关研究成果的性能和应用尚需要进一步验证和推广。如何结合深度学习和大数据分析技术,研究算法进化过程中的中间数据,必将有助于提升算法性能,也是未来研究方向之一。

8.3 应用层面

生产过程的优化是智能制造关键核心环节之一,对于企业有着重要的现实意义。目前,HFS调度问题已经在玻璃生产、炼钢过程、航空复合材料制造等过程等诸多实际生产优化过程。现实生产过程中,必定存在各类工艺约束或资源约束^[119],如何综合考虑企业生产过程中的多约束HFS问题,融合新的工艺约束条件,譬如人力与其他资源约束、能耗约束、经济约束等条件,使得理论成果更好的应用于生产实际,将是该方向一个挑战性问题,也是未来研究热点内容。

另一方面,在经济全球化的背景下,生产企业必定面临新的调整,生产过程也将随之发生变化,分布式生成模式将成为企业的主流模式,随之而来的是,分布式HFS调度问题必将成为研究热点。目前,已经有了一些分布式HFS问题的相关研究成果^[66,120-127],但围绕时间约束HFS的分布式调度相关理论、方法的研究亟待发展和完善。

最后,随着全球经济的发展,各类成本最小化必将成为工业生产的重要目标。但相关研究成果较少且不系统,考虑成本和其他多目标优化必将成为未来研究热点。

参考文献:

- [1] RUIZ R, VAZQUEZ RODRIGUEZ J A. The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1): 1 – 18.
- [2] RIBAS I, LEISTEN R, FRAMINAN JM. Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production systems and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(8): 1439 – 1454.
- [3] XUAN Hua, LI Bing, WANG Xueyuan, et al. Multi-stage dynamic reentrant hybrid flow shop scheduling with transportation consideration. *Control Theory & Application*, 2018, 35(3): 357 – 366. (轩华, 李冰, 王薛苑, 等. 带运输考虑的多阶段动态可重入混合流水车间调度. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 357 – 366.)
- [4] ZHOU Binghai, ZHONG Zhenyi. Lagrangian relaxation algorithm for reentrant hybrid flow shop scheduling. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(7): 881 – 886. (周炳海, 钟臻怡. 可重入混合流水车间调度的拉格朗日松弛算法. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 881 – 886.)
- [5] WANG Ling, ZHOU Gang, XU Ye, et al. Artificial bee swarm algorithm for solving unrelated parallel machine hybrid pipeline scheduling problem. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(12): 1551 – 1557. (王凌, 周刚, 许烨, 等. 求解不相关并行机混合流水线调度问题的人工蜂群算法. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1551 – 1557.)
- [6] PINEDO M, HADAVI K. Scheduling: theory, algorithms and systems development. *Operations Research Proceedings 1991*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992: 35 – 42.
- [7] GAREY M R, JOHNSON D S, SETHI R. The complexity of flow-shop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1976, 1(2): 117 – 129.
- [8] GUPTA J N D. Two-stage, hybrid flow shop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 1988, 39(4): 359 – 364.
- [9] HOOGEVEEN J A, LENSTRA J K, VELTMAN B. Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operational Research*, 1996, 89(1): 172 – 175.
- [10] VIGEIER A, DARDILHAC D, DEZALAY D, et al. A branch and bound approach to minimize the total completion time in a k-stage hybrid flowshop. *Proceedings of 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Kauai, USA: IEEE, 1996, 1: 215 – 220.
- [11] YANG J. A new complexity proof for the two-stage hybrid flow shop scheduling problem with dedicated machines. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(5): 1531 – 1538.
- [12] YANG J. Minimizing total completion time in a two-stage hybrid flow shop with dedicated machines at the first stage. *Computers & Operations Research*, 2015, 58(6): 1 – 8.
- [13] QUADT D, KUHN H. A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(3): 686 – 698.
- [14] RUIZ R, SERIFOGLU F S, URLINGS T. Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(4): 1151 – 1175.
- [15] CHAMNANLOR C, SETHANAN K, GEN M, et al. Embedding ant system in genetic algorithm for re-entrant hybrid flow shop scheduling problems with time window constraints. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 28(8): 1915 – 1931.
- [16] NIU Q, ZHOU T, MA S. A quantum-inspired immune algorithm for hybrid flow shop with makespan criterion. *Journal of Universal Computer Science*, 2009, 15(4): 765 – 785.
- [17] NADERI B, ZANDIEH M, BALAGH A K G, et al. An improved simulated annealing for hybrid flowshops with sequence-dependent setup and transportation times to minimize total completion time and total tardiness. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(6): 9625 – 9633.
- [18] TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, SAFAEI N, SASSANI F. A memetic algorithm for the flexible flow line scheduling problem with processor blocking. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(2): 402 – 414.
- [19] JUNGWATTANAKIT J, REODECHA M, CHAOVALITWONGSE P, et al. A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(2): 358 – 378.
- [20] WANG X, TANG L. A tabu search heuristic for the hybrid flow-shop scheduling with finite intermediate buffers. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(3): 907 – 918.
- [21] ADRESSI A, HASSANPOUR S, AZIZI V. Solving group scheduling problem in no-wait flexible flowshop with random machine breakdown. *Decision Science Letters*, 2016, 5(1): 157 – 168.
- [22] WANG S, LIU M, CHU C. A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(4): 1143 – 1167.

- [23] HARBAOUI H, KHALFALLAH S, BELLENGUEZ-MORINEAU O. A case study of a hybrid flow shop with no-wait and limited idle time to minimize material waste. *2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. Subotica, Serbia: IEEE, 2017.
- [24] WANG S, LIU M. A genetic algorithm for two-stage no-wait hybrid flow shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(4): 1064 – 1075.
- [25] LIU Z X, XIE J J, LI J G, et al. A heuristic for two-stage no-wait hybrid flowshop scheduling with a single machine in either stage. *Tsinghua Science and Technology*, 2003, 8(1): 43 – 48.
- [26] CHANG Xiaokun, DONG Ming. Solving the hybrid flowshop problem with limited waiting times in a stochastic environment. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(5): 35 – 41.
(常晓坤, 董明. 不确定环境下等待时间受限的混合流水车间调度问题研究. 工业工程与管理, 2016, 21(5): 35 – 41.)
- [27] CHUNG T P, SUN H, LIAO C J. Two new approaches for a two-stage hybrid flowshop problem with a single batch processing machine under waiting time constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113(6): 859 – 870.
- [28] SONG Jiwei, TANG Jiafu. No-wait hybrid flow shop scheduling method based on DPSO. *Journal of system Simulation*, 2010, 22(10): 2257 – 2261.
(宋继伟, 唐加福. 基于DPSO的无等待混合流水车间调度方法. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2257 – 2261.)
- [29] CUI Jianshuang, LI Tieke, ZHANG Wenxin. Hybrid flow shop scheduling model and its genetic algorithm. *Journal of Engineering Science*, 2005, 27(5): 623 – 626.
(崔建双, 李铁克, 张文新. 混合流水车间调度模型及其遗传算法. 工程科学学报, 2005, 27(5): 623 – 626.)
- [30] LI Yan, LI Tieke. Research on non-waiting hybrid flow shop scheduling problem based on constrained programming. *Chemical Automation and Instrumentation*, 2007, 34(3): 26 – 29.
(李岩, 李铁克. 基于约束规划的无等待混合流水车间调度问题研究. 化工自动化及仪表, 2007, 34(3): 26 – 29.)
- [31] ZHANG Qiliang, CHEN Yongsheng. Particle swarm optimization algorithm for solving bi-directional non-waiting hybrid flow shop scheduling problem. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2013, 19(10): 2503 – 2509.
(张其亮, 陈永生. 求解双向无等待混合流水车间调度问题的粒子群优化算法. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 2503 – 2509.)
- [32] ZHANG Qiliang, CHEN Yongsheng. The hybrid particle swarm optimization-NEH algorithm is used to solve the non-waiting flexible flow shop scheduling problem. *Theory and Practice of Systems Engineering*, 2014, 34(3): 802 – 809.
(张其亮, 陈永生. 基于混合粒子群-NEH算法求解无等待柔性流水车间调度问题. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3): 802 – 809.)
- [33] SANTOSA B, SISWANTO N. Discrete particle swarm optimization to solve multi-objective limited-wait hybrid flow shop scheduling problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 337(1): 1 – 10.
- [34] XUAN Hua, TANG Lixin. A Lagrangian relaxation algorithm for real-time no-wait HFS scheduling. *Control and Decision*, 2006, 21(4): 376 – 380.
(轩华, 唐立新. 实时无等待HFS调度的一种拉格朗日松弛算法. 控制与决策, 2006, 21(4): 376 – 380.)
- [35] XUAN Hua, SUN Zhenxuan, LI Bing. Optimization research on zero-wait hybrid flow shop problem. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(5): 13 – 17.
(轩华, 孙振轩, 李冰. 零等待混合流水车间问题优化研究. 工业工程与管理, 2014, 19(5): 13 – 17.)
- [36] SUN Zhenxuan. *Research on zero-wait hybrid flow shop scheduling based on improved Lagrangian relaxation*. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
(孙振轩. 基于改进拉格朗日松弛的零等待混合流水车间调度研究. 郑州: 郑州大学, 2015.)
- [37] SONG Jiwei, TANG Jiafu. Roll heat treatment scheduling method based on discrete particle swarm optimization. *Journal of Management Science*, 2010, 13(6): 44 – 53.
(宋继伟, 唐加福. 基于离散粒子群优化的轧辊热处理调度方法. 管理科学学报, 2010, 13(6): 44 – 53.)
- [38] ABDOLLAHPOUR S, REZAIAN J. Two new meta-heuristics for no-wait flexible flow shop scheduling problem with capacitated machines, mixed make-to-order and make-to-stock policy. *Soft Computing*, 2017, 21(12): 3147 – 3165.
- [39] MORADINASAB N, SHAFAEI R, RABIEE M, et al. No-wait two stage hybrid flow shop scheduling with genetic and adaptive imperialist competitive algorithms. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2013, 25(2): 207 – 225.
- [40] WU TAO, CHEN Rongqiu. Heuristic algorithm for production scheduling model of cold coil heat treatment. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2006, 33(10): 58 – 60.
(吴涛, 陈荣秋. 冷卷热处理生产调度模型的启发式算法. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 33(10): 58 – 60.)
- [41] HUANG W, LI S. A two-stage hybrid flowshop with uniform machines and setup times. *Mathematical and Computer Modelling*, 1998, 27(2): 27 – 45.
- [42] LIN H T, LIAO C J. A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines. *International Journal of Production Economics*, 2003, 86(2): 133 – 143.
- [43] GUPTA J N D, TUNC E A. Scheduling a two-stage hybrid flowshop with separable setup and removal times. *European Journal of Operational Research*, 1994, 77(3): 415 – 428.
- [44] HEKMATFAR M, GHOMI S M T F, KARIMI B. Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 4530 – 4539.
- [45] NADERI B, ZANDIEH M, GHOMI S M T F. A study on integrating sequence dependent setup time flexible flow lines and preventive maintenance scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2009, 20(6): 683 – 694.
- [46] ZANDIEH M, GHOMI S M T F, HUSSEINI S M M. An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence-dependent setup times. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 180(1): 111 – 127.
- [47] ZANDIEH M, GHOLAMI M. An immune algorithm for scheduling a hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(24): 6999 – 7027.
- [48] GHOLAMI M, ZANDIEH M, ALEM-TABRIZ A. Scheduling hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42(1/2): 189 – 201.
- [49] BEHNAMIAN J, FATEMI GHOMI S M T, ZANDUEH M. Development of a hybrid metaheuristic to minimise earliness and tardiness in a hybrid flowshop with sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(5): 1415 – 1438.
- [50] MIRSANEI H S, ZANDIEN M, MOAYED M J, et al. A simulated annealing algorithm approach to hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(6): 965 – 978.
- [51] JAVADIAN N, FATTABI P, FARAHMAND-MEHR M, et al. An immune algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with time lags and sequence-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(1/2/3/4): 337 – 348.

- [52] PARGAR F, ZANDIEH M. Bi-criteria SDST hybrid flow shop scheduling with learning effect of setup times: water flow-like algorithm approach. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(10): 2609 – 2623.
- [53] GOMEZ-GASQUET P, ANDRES C, LARIO F C. An agent-based genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times to minimise makespan. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(9): 8095 – 8107.
- [54] LI J, SANG H, HAN Y, et al. Efficient multi-objective optimization algorithm for hybrid flow shop scheduling problems with setup energy consumptions. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 181(8): 584 – 598.
- [55] LUO H, HUANG G Q, SHI Y, et al. Hybrid flowshop scheduling with family setup time and inconsistent family formation. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(6): 1457 – 1475.
- [56] LUO H, ZHANG A, HUANG G Q. Active scheduling for hybrid flowshop with family setup time and inconsistent family formation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(1): 169 – 187.
- [57] PAN Q K, GAO L, LI X Y, et al. Effective metaheuristics for scheduling a hybrid flowshop with sequence-dependent setup times. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 303(11): 89 – 112.
- [58] RUIZ R, MAROTO C. A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(3): 781 – 800.
- [59] EBRAHIMI M, GHOMI S M T F, KARIMI B. Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(9/10): 2490 – 2504.
- [60] AHONEN H, ALVARENGA A G. Scheduling flexible flow shop with recirculation and machine sequence-dependent processing times: formulation and solution procedures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1/2/3/4): 765 – 777.
- [61] GOLNESHINI F P, FAZLOLLAHTABAR H. Meta-heuristic algorithms for a clustering-based fuzzy bi-criteria hybrid flow shop scheduling problem. *Soft Computing*, 2019, 23(22): 12103 – 12122.
- [62] BEHNAMIAN J, GHOMI S M T F. Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(3): 1107 – 1123.
- [63] ZHANG Jie, QIN Wei, SONG Daili. Hybrid flow shop rolling scheduling method considering uncertain working hours. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(11): 99 – 108.
(张洁, 秦威, 宋代立. 考虑工时不确定的混合流水车间滚动调度方法. 机械工程学报, 2015, 51(11): 99 – 108.)
- [64] GONZALEZ-NEIRA E M, GARCIA-CACERES R G, CABALLERO-VILLALOBOS J P, et al. Stochastic flexible flow shop scheduling problem under quantitative and qualitative decision criteria. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 101(5): 128 – 144.
- [65] QIN W, ZHANG J, SONG D. An improved ant colony algorithm for dynamic hybrid flow shop scheduling with uncertain processing time. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(4): 891 – 904.
- [66] ZHENG J, WANG L, WANG J, et al. A cooperative coevolution algorithm for multi-objective fuzzy distributed hybrid flow shop. *Knowledge Based Systems*, 2020, 194(2): 1 – 11.
- [67] ZHOU B, LIU W. Energy-efficient multi-objective scheduling algorithm for hybrid flow shop with fuzzy processing time. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2019, 233(10): 1282 – 1297.
- [68] ZARE H K, FAKHRZAD M B. Solving flexible flow-shop problem with a hybrid genetic algorithm and data mining: A fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 7609 – 7615.
- [69] YUAN F, XU X, YIN M, et al. A novel fuzzy model for multi-objective permutation flow shop scheduling problem with fuzzy processing time. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(4): 16878140 – 19843699.
- [70] WANG S, WANG L, LIU M, et al. An order-based estimation of distribution algorithm for stochastic hybrid flow-shop scheduling problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 28(3): 307 – 320.
- [71] CHOI S H, WANG K. Flexible flow shop scheduling with stochastic processing times: A decomposition-based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(2): 362 – 373.
- [72] WANG K, CHOI S H, QIN H. An estimation of distribution algorithm for hybrid flow shop scheduling under stochastic processing times. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(24): 7360 – 7376.
- [73] JOLAI F, RABIEE M, ASEFI H. A novel hybrid meta-heuristic algorithm for a no-wait flexible flow shop scheduling problem with sequence dependent setup times. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(24): 7447 – 7466.
- [74] ASEFI H, JOLAI F, RABIEE M, et al. A hybrid NSGA-II and VNS for solving a bi-objective no-wait flexible flowshop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(5/6/7/8): 1017 – 1033.
- [75] RABIEE M, RAD R S, MAZINANI M, et al. An intelligent hybrid meta-heuristic for solving a case of no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(5/6/7/8): 1229 – 1245.
- [76] RABIEE M, JOLAI F, ASEFI H, et al. A biogeography-based optimisation algorithm for a realistic no-wait hybrid flow shop with unrelated parallel machines to minimise mean tardiness. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 29(9): 1007 – 1024.
- [77] RAMEZANI P, RABIEE M, JOLAI F. No-wait flexible flowshop with uniform parallel machines and sequence-dependent setup time: a hybrid meta-heuristic approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(4): 731 – 744.
- [78] ATTAR S F, MOHAMMADI M, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, et al. Solving a new multi-objective hybrid flexible flowshop problem with limited waiting times and machine-sequence-dependent set-up time constraints. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(5): 450 – 469.
- [79] WANG S, WANG X, YU L, et al. Two-stage no-wait hybrid flowshop scheduling with sequence-dependent setup times. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2019, 51(4): 1 – 17.
- [80] WANG Shijin, WANG Xiaodong. Optimization of two-stage hybrid pipelining scheduling with setup and finite waiting time. *Industrial Engineering and Management*, 2019, 24(2): 137 – 146.
(王世进, 王晓东. 结合Setup和有限等待时间的两阶段混合流水调度优化. 工业工程与管理, 2019, 24(2): 137 – 146.)
- [81] YAU RIMA V, BURTSEVA L, TCHERNYKH A. Hybrid flowshop with unrelated machines, sequence-dependent setup time, availability constraints and limited buffers. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(4): 1452 – 1463.
- [82] RASHIDI E, JAHANDAR M, ZANDIEH M. An improved hybrid multi-objective parallel genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(9/10/11/12): 1129 – 1139.
- [83] ABYANEH S H, ZANDIEH M. Bi-objective hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times and limited buffers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(1/2/3/4): 309 – 325.

- [84] ZHANG Zhiying, LIN Chen, YANG Liansheng, et al. Hybrid flow shop scheduling for segmented painting operation. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(3): 382 – 387.
(张志英, 林晨, 杨连生, 等. 面向分段涂装作业的混合流水车间调度. 上海交通大学学报, 2014, 48(3): 382 – 387.)
- [85] ERICK Phares Massami. *Port container loading and unloading optimization model*. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
(ERICK Phares Massami(艾瑞克). 港口集装箱装卸优化模型. 大连: 大连海事大学, 2012.)
- [86] PAN Q K, WANG L, MAO K, et al. An effective artificial bee colony algorithm for a real-world hybrid flowshop problem in steelmaking process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 10(2): 307 – 322.
- [87] MAO K, PAN Q K, PANG X, et al. A novel Lagrangian relaxation approach for a hybrid flowshop scheduling problem in the steelmaking-continuous casting process. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(1): 51 – 60.
- [88] LUO Shumin. *Research on reentrant hybrid flow shop scheduling optimization based on hybrid genetic algorithm*. Zhengzhou, Henan: Zhengzhou University, 2018.
(罗书敏. 基于混合遗传算法的可重入混合流水车间调度优化研究. 河南, 郑州: 郑州大学, 2018.)
- [89] HE Xiaomei, DONG Shaohua. Research on rush order insertion rescheduling problem under hybrid flow shop with multi-objective and multi-constraint. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(11): 1450 – 1457.
(何小妹, 董绍华. 多目标多约束混合流水车间插单重调度问题研究. 工程科学学报, 2019, 41(11): 1450 – 1457.)
- [90] SUN L, YU S. Scheduling a real-world hybrid flow shop with variable processing times using Lagrangian relaxation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9/10/11/12): 1961 – 1970.
- [91] LONG J, ZHENG Z, GAO X, et al. Scheduling a realistic hybrid flow shop with stage skipping and adjustable processing time in steel plants. *Applied Soft Computing*, 2018, 64(1): 536 – 549.
- [92] ZHANG B, PAN Q K, GAO L, et al. A three-stage multiobjective approach based on decomposition for an energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 99(5): 1 – 16.
- [93] LEI C, ZHAO N, YE S, et al. Memetic algorithm for solving flexible flow-shop scheduling problems with dynamic transport waiting times. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 139(1): 105984 – 105999.
- [94] FATTAHI P, HOSSEINI S M H, JOLAI F, et al. A branch and bound algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with setup time and assembly operations. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(1): 119 – 134.
- [95] MOUSAVI S M, MAHDAVI I, REZAEIAN J, et al. Bi-objective scheduling for the re-entrant hybrid flow shop with learning effect and setup times. *Scientia Iranica*, 2018, 25(4): 2233 – 2253.
- [96] GICQUEL C, HEGEL L, MINOUX M, et al. A discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(3): 629 – 636.
- [97] ATTAR S F, MOHAMMADI M, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. Hybrid flexible flowshop scheduling problem with unrelated parallel machines and limited waiting times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5/6/7/8): 1583 – 1599.
- [98] ZENG Qingcheng, CHEN Zigen, HUANG Ling. Multi-stage hybrid pipeline model for synchronous loading and unloading scheduling of container terminals. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2015, 49(4): 93 – 99.
(曾庆成, 陈子根, 黄玲. 集装箱码头同贝同步装卸调度的多阶段混合流水线模型. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 93 – 99.)
- [99] LIN Chen, ZHANG Zhiying. Batch-discrete hybrid flow shop scheduling considering transportation time window. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2015, 21(9): 2427 – 2434.
(林晨, 张志英. 考虑运输时间窗的批-离散混合流水车间调度. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2427 – 2434.)
- [100] ALMEDER C, HARTL R F. A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer. *International Journal of Production Economics*, 2013, 145(1): 88 – 95.
- [101] MOLLAEI A, MOHAMMADI M, NADERI B. A bi-objective MILP model for blocking hybrid flexible flow shop scheduling problem: robust possibilistic programming approach. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2019, 14(2): 137 – 146.
- [102] ELMİ A, TOPALOĞLU S. A scheduling problem in blocking hybrid flow shop robotic cells with multiple robots. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(10): 2543 – 2555.
- [103] ELMİ A, TOPALOĞLU S. Scheduling multiple parts in hybrid flow shop robotic cells served by a single robot. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(12): 1144 – 1159.
- [104] LIU Z, YAN J, CHENG Q, et al. The mixed production mode considering continuous and intermittent processing for an energy-efficient hybrid flow shop scheduling. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246(3): 1 – 29.
- [105] XUAN H, LI B. Scheduling dynamic hybrid flowshop with serial batching machines. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, 64(6): 825 – 832.
- [106] XUAN Hua, TANG Lixin. Dynamic hybrid flow shop scheduling problem with multiprocessor tasks. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2007, 13(11): 2254 – 2260, 2288.
(轩华, 唐立新. 带多处理器任务的动态混合流水车间调度问题. 计算机集成制造系统, 2007, 13(11): 2254 – 2260, 2288.)
- [107] XUAN Hua. Improved Lagrangian relaxation algorithm for mixed flow shop scheduling with limited transport capacity. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2013, 18(7): 195 – 201.
(轩华. 运输能力有限混合流水车间调度的改进拉格朗日松弛算法. 计算机集成制造系统, 2013, 18(7): 195 – 201.)
- [108] ZHONG W Y, LV L H. Hybrid flowshop scheduling with interstage job transportation. *Journal of the Operations Research Society of China*, 2014, 2(1): 109 – 121.
- [109] ZABIHZADEH S S, REZAEIAN J. Two meta-heuristic algorithms for flexible flow shop scheduling problem with robotic transportation and release time. *Applied Soft Computing*, 2016, 40(1): 319 – 330.
- [110] HIDRI L, ELKOSANTINI S, MABKHOT M M. Exact and heuristic procedures for the two-center hybrid flow shop scheduling problem with transportation times. *IEEE Access*, 2018, 6(4): 21788 – 21801.
- [111] KHARE A, AGRAWAL S. Scheduling hybrid flowshop with sequence-dependent setup times and due windows to minimize total weighted earliness and tardiness. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135(5): 780 – 792.
- [112] SOLTANI S A, KARIMI B. Cyclic hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers and machine eligibility constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9/10/11/12): 1739 – 1755.
- [113] ZHOU Binghai, WANG Teng. Scheduling multiple orders per job with various constraints for hybrid flow shop. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 776 – 782.
(周炳海, 王腾. 考虑多约束的混合流水车间MOJ调度. 控制与决策, 2016, 31(5): 776 – 782.)

- [114] LIN C, LIU W, CHEN Y, et al. Considering stockers in reentrant hybrid flow shop scheduling with limited buffer capacity. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 139(1): 106 – 154.
- [115] ZOHALI H, NADERI B, MOHAMMADI M. The economic lot scheduling problem in limited-buffer flexible flow shops: Mathematical models and a discrete fruit fly algorithm. *Applied Soft Computing*, 2019, 80(2): 904 – 9.
- [116] ZHONG W, SHI Y. Two-stage no-wait hybrid flowshop scheduling with inter-stage flexibility. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2018, 35(1): 108 – 125.
- [117] ZHANG Xin. *Dynamic scheduling model of manufacturing supply chain based on interference management*. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
(张鑫. 基于干扰管理的制造供应链动态调度模型. 大连: 大连理工大学, 2015.)
- [118] YAZDANI M, NADERI B. Modeling and scheduling no-idle hybrid flow shop problems. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2016, 10(21): 59 – 66.
- [119] LI Junqing, PAN Quanke. A hybrid optimization algorithm for solving fuzzy job shop scheduling problem. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 142 – 149.
(李俊青, 潘全科. 求解模糊作业车间调度问题的混合优化算法. 机械工程学报, 2013, 49(23): 142 – 149.)
- [120] YING K C, LIN S W. Minimizing makespan for the distributed hybrid flowshop scheduling problem with multiprocessor tasks. *Expert Systems with Applications*, 2018, 92(1): 132 – 141.
- [121] CAI J, ZHOU R, LEI D. Dynamic shuffled frog-leaping algorithm for distributed hybrid flow shop scheduling with multiprocessor tasks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 90(2): 1 – 13.
- [122] SHAO W, SHAO Z, PI D. Modeling and multi-neighborhood iterated greedy algorithm for distributed hybrid flow shop scheduling problem. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 194(2): 1 – 31.
- [123] LI Y, LI F, PAN Q K, et al. An artificial bee colony algorithm for the distributed hybrid flowshop scheduling problem. *Procedia Manufacturing*, 2019, 39(1): 1158 – 1166.
- [124] LEI D, WANG T. Solving distributed two-stage hybrid flowshop scheduling using a shuffled frog-leaping algorithm with memplex grouping. *Engineering Optimization*, 2019, 24(12): 1 – 14.
- [125] HAO J, LI J, DU Y, et al. Solving distributed hybrid flowshop scheduling problems by a hybrid brain storm optimization algorithm. *IEEE Access*, 2019, 7(5): 66879 – 66894.
- [126] LEI Deming, WANG Tian. Distributed two-stage hybrid flow shop scheduling based on improved leapfrog algorithm. *Control and Decision*, 2020, 34(9): 1 – 7.
(雷德明, 王甜. 基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度. 控制与决策, 2020, 34(9): 1 – 7.)
- [127] CAI Jincan, LEI Deming. Distributed two-stage hybrid flow shop scheduling considering preparation time. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(3): 1 – 19.
(蔡劲草, 雷德明. 考虑准备时间的分布式两阶段混合流水车间调度. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 1 – 19.)

作者简介:

李俊青 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: lijunqing@lcu-cs.com;

李文涵 硕士研究生, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: liwenhan940614@126.com;

陶昕瑞 硕士研究生, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: taoxinruilcu@163.com;

杜宇 博士研究生, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: dydiscupse@163.com;

韩玉艳 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: hanyuyan@lcu-cs.com;

潘全科 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能优化与调度, E-mail: panquanke@shu.edu.cn.