

控制与决策

Control and Decision

具有外包选择的绿色混合流水车间生产调度优化

程俊恒, 程静雅, 黄宇枫, 林艳泓

引用本文:

程俊恒, 程静雅, 黄宇枫, 等. 具有外包选择的绿色混合流水车间生产调度优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(9): 2807–2816.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1502>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型](#)

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

[带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法](#)

Hybrid heuristic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and finite buffers

控制与决策. 2021, 36(3): 565–576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0835>

[区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化](#)

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

[基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度](#)

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

[基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度](#)

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

控制与决策. 2021, 36(1): 143–151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

具有外包选择的绿色混合流水车间生产调度优化

程俊恒^{1†}, 程静雅^{1,2}, 黄宇枫¹, 林艳泓¹

(1. 福建师范大学 经济学院, 福州 350117; 2. 泉州信息工程学院 经济与管理学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 针对考虑外包的两阶段混合流水车间绿色调度问题, 制造商可将部分工件的第 1 阶段工序外包给多个待选外包商, 其中外包工件在第 2 阶段内部加工前需要考虑运输时间和成本. 首先, 构建一个新的混合整数线性规划 (MILP) 模型, 旨在最小化制造周期、总成本以及总能源消耗的加权和目标, 各目标的权重参数通过基于指数标度的 AHP-熵值综合赋权法确定. 然后, 鉴于问题的 NP 难性质, 结合问题特性进一步提出一种高效的两阶段启发式算法 (ETH), 该算法将问题分解为两个并行机调度子问题, 并明确阶段间的优先关系. 在两个阶段中: 先分别根据约翰逊规则和先到先服务规则确定工件顺序; 之后, 基于贪心思想将工件分配至机器; 同时, 第 1 阶段的决策综合考虑运输时间和外包成本等约束条件. 实验对比结果验证了 ETH 算法在求解效率和优化质量上相较于传统舍入启发式算法 (RH) 的优越性.

关键词: 混合流水车间; 生产调度; 两阶段启发式算法; 外包; 绿色调度

中图分类号: C935 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1502

引用格式: 程俊恒, 程静雅, 黄宇枫, 等. 具有外包选择的绿色混合流水车间生产调度优化 [J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2807-2816.

Production scheduling optimization of green hybrid flow shop with outsourcing options

CHENG Jun-heng^{1†}, CHENG Jing-ya^{1,2}, HUANG Yu-feng¹, LIN Yan-hong¹

(1. School of Economics, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. School of Economics and Management, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou 362000, China)

Abstract: This study addresses a two-stage hybrid flow shop green scheduling problem considering outsourcing, where the manufacturer can outsource the first-stage operations of certain jobs to multiple potential outsourcers, with transportation time and cost considered before the second-stage internal processing. A new mixed-integer linear programming (MILP) model is developed to minimize the weighted sum of makespan, total cost, and total energy consumption. The weights for objectives are determined using the AHP-entropy composite weighting method based on the index number scale. Given the NP-hard nature of the problem, an efficient two-stage heuristic (ETH) algorithm is proposed based on the characteristics of the problem. The ETH algorithm decomposes the problem into two parallel machine scheduling sub-problems while clarifying the priority relationships between stages. In the two stages, the processing sequence of jobs is first determined according to the Johnson's rule and the first come first serve rule, respectively; followed by allocating jobs to machines based on the greedy idea, with the first stage explicitly considering constraints of transportation time and outsourcing costs. Finally, experimental comparisons demonstrate that the ETH algorithm outperforms the traditional rounding heuristic (RH) algorithm in both solution efficiency and optimization quality.

Keywords: hybrid flow shop; production scheduling; two-stage heuristic; outsourcing; green scheduling

0 引言

近年来, 能源消耗和气候变化已成为国际社会关注的核心问题. 根据美国能源信息署 (USEIA) 的

预测, 到 2050 年, 全球能源需求将稳步上升, 其中工业部门的能源消耗预计增长 9% ~ 62%^[1]. 这表明, 降低制造业能耗对于实现全球节能减排目标至关重要

收稿日期: 2024-12-28; 录用日期: 2025-05-21.

基金项目: 福建省社会科学基金项目 (F2024B135); 国家自然科学基金青年基金项目 (71901069).

责任编辑: 唐加福.

[†]通信作者. E-mail: junheng.cheng@fjnu.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

要. 为积极应对这一挑战, 各国政府相继制定并实施了多项环保法规和政策, 推动制造业加快绿色转型, 迈向低碳和可持续发展. 在此背景下, 制造企业追求经济效益的同时, 需要通过节能减排应对环境压力. 在实践中, 通常采用两种主要策略: 一是采用更加节能的加工设备和技术, 二是实施低碳、节能的调度优化方案^[2]. 相比于设备升级, 绿色调度优化方案更具经济性和灵活性, 已成为制造企业, 尤其是高能耗企业实现节能减排的重要手段^[3].

与此同时, 外包作为企业应对复杂多变市场需求的重要策略, 为进一步扩展内部制造系统提供了有效途径. 通过外包获取外部制造资源, 企业在应对产能不足时能够有效降低成本、提升生产灵活性和市场竞争力. 一般而言, 外包主要分为工件外包和工序外包两种模式: 工件外包是指整个工件被外包, 而工序外包则是在工件中针对各工序独立决策是否外包^[4]. 随着社会分工的不断细化, 多外包商环境下的工序外包调度优化应用日益广泛, 同时, 在不同工序间的运输时间和成本也逐渐成为外包决策中的重要考量因素.

流水车间调度作为典型的制造环境, 在制造业多个领域有广泛应用. 混合流水车间调度 (HFSP) 是传统流水车间调度 (FSP) 与并行机调度的结合, 能够适应多阶段并行设备的复杂生产需求. 其中: 两阶段混合流水车间调度是 HFSP 的重要形式, 其特点是包含两个加工阶段, 每个阶段有多台并行机器. 这一形式兼具实际应用价值和较高计算复杂性, 已被证明为 NP 难问题^[5]. 针对两阶段流水车间调度, 研究者提出了基于数学规划、启发式算法^[6-8] 和智能优化算法^[9-12] 的多种求解方案. 同时, 为满足绿色低碳和灵活生产的需求, 绿色调度和外包调度逐渐成为该领域研究的重点. 在绿色调度方面, 研究主要围绕节能和碳排放优化展开. Mansouri 等^[13] 针对一个双机流水车间的绿色调度问题开发了启发式方法, 以优化能源消耗和制造时间; Wang 等^[14] 针对分时电价和多机器状态, 优化了实际玻璃生产中的两阶段 HFSP 的最大完工时间和总能耗; Zheng 等^[15] 通过混合整数规划模型与 MHACO-Johnson 算法, 优化了最大完工时间和总能耗成本; Dong 等^[16] 在分布式两阶段可重入流水车间中, 以最大完工时间、总碳排放和总能耗成本为优化目标, 提出了 IHSN 算法并验证了其有效性; Xue 等^[17] 考虑了分时电价下节能两阶段流水车间调度, 以最小化总电力成本和平均拖期; Wang 等^[18] 考虑了分时电价下的流水车间调度问题, 以优化客户满意度和总电力成本; 王静等^[19] 研

究了同时优化最大模糊完工时间和模糊总能耗的绿色模糊混合流水车间调度问题. 在外包调度方面, 研究聚焦于外包成本与生产效率的平衡. Kim 等^[20] 研究了涉及不同目标的工件外包问题, 提出了启发式和分枝定界算法, 随后进一步研究了最小化总外包成本与生产时间加权和的优化问题^[21]; 陈光亭等^[22] 提出了一个近似算法, 以优化两台机器流水车间的外包成本和最大完工时间; 刘乐等^[23] 和 Liu^[24] 开发了数学模型和混合变邻域搜索算法优化类似问题; Lee 等^[25] 提出了一种优化两阶段生产调度外包选择的近似算法; 在此基础上, Jiang 等^[26] 进一步研究了允许每个工序外包或内部处理的两阶段调度问题, 提出了性能更优的改进贪心算法; 此外, 针对实际生产中外包涉及的运输问题, 李琳^[27] 研究了涉及外包工件批量运输的两阶段流水车间调度问题, 并设计了基于规则的启发式算法, 以最小化最大完工时间与总成本的加权和; Ahmadizar 等^[28] 则研究了一个带释放时间的两台机器流水车间调度问题, 综合考虑外包和运输成本, 提出了结合占优属性和蚁群算法的方法. 然而, 这些研究多集中于流水车间的绿色调度或外包调度的独立优化, 鲜有研究综合考虑绿色调度和外包调度需求. 同时, 阶段间运输时间和成本对于整体目标的影响也缺乏系统探讨.

鉴于此, 本文研究带有工序外包选择的两阶段混合流水车间绿色调度问题, 综合考虑阶段间的运输时间和成本, 优化目标为最小化制造期、总成本与总能耗的加权和, 以兼顾经济和环境效益, 其中总成本 (能耗) 包括工件生产和运输环节产生的成本 (能耗). 首先, 构建一个混合整数线性规划 (MILP) 模型来描述问题, 并证明问题的 NP 难特性; 然后, 结合调度规则以及所研究问题特性开发一种两阶段高效启发式算法 (ETH), 以解决大规模实例问题; 最后, 通过实验结果表明, 与传统舍入启发式 (RH) 算法相比, ETH 算法能够在求解效率和优化质量方面表现出显著优势, 为制造企业绿色生产和外包决策的综合优化提供了新的解决方案.

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

本文研究了具有外包选择的两阶段混合流水车间绿色调度问题 (GOTHFS), 如图 1 所示. 问题定义如下: 对于制造商而言, 有 J 个工件需要在两阶段混合流水车间加工, 其中每个阶段 k ($k = 1, 2$) 均有 M^k 台不相关并行机. 每个工件 j 必须保证在内部机器或通过外包完成第 1 阶段加工, 第 2 阶段的工序只能

在内部机器上完成. 具体而言, 在第1阶段, 有 I 家企业. 这里默认第1家企业为制造商, 其余 $i = 2, 3, \dots, I$ 为外包商. 每个企业 i 在阶段1有 M_i^1 台机器, 机器按照企业顺序统一编号, 即 $M^1 = \sum_{i=1}^I |M_i^1|$, $m = \{1, 2, \dots, |M_1^1|, (|M_1^1| + 1), (|M_1^1| + 2), \dots, (|M_1^1| + |M_2^1|), \dots, (\sum_{i=1}^{I-1} |M_i^1| + 1), \dots, \sum_{i=1}^I |M_i^1|\}$. 若工件 j 在阶段1的外包机器上加工, 则需要支付外包成本 $w_{j,m}$; 在内部机器上则为0, 即当 $m \in |M_1^1|$ 时, $w_{j,m} = 0$. 在现实场景中, 制造商和不同的外包商往往处于不同的位置, 因此, 需要考虑阶段间的运输时间和成本. 第1阶段在外包机器上加工的工件到第2阶段内部机器上加工的运输差异距离为 $d_{j,m}$. 若工件第1阶段在内部机器加工, 则运输距离为0, 即当 $m \in |M_1^1|$ 时, $d_{j,m} = 0$. 为便于预估工件在第2阶段的可行到达时间, 引入了运输平均速度 tv , 以 $d_{j,m}/tv$ 表示从外包机器 m 运回内部车间的时间. 对于第2阶段, 工件只在制造商的内部机器上加工, 即 $m = 1, 2, \dots, |M^2|$. 工件 j 在每个阶段 k 的加工时间为 p_j^k , 阶段 k 的机器 m 的加工速度为 v_m^k , 单位加工能耗为 e_m^k . 阶段 k 中每个工件 j 在机器 m 上的实际加工时间为 $p_{j,m}^k$, 即 $p_{j,m}^k = \frac{p_j^k}{v_m^k}$.

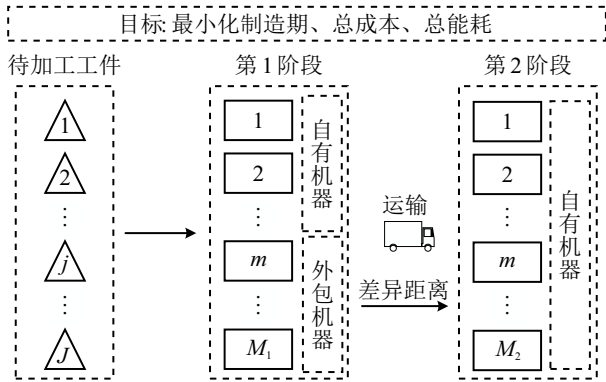


图1 GOTHFS 调度问题示意图

该问题旨在确定工件在阶段1是否选择外包, 及其在内部机器和外包机器的排序和分配方案, 以及阶段2时在内部机器上排序和分配方案, 且保证其在阶段2的开始时间不早于阶段1的完工时间加运输时间. 同时, 以上决策需要兼顾外包成本、外包机器位置, 以及生产和运输的成本与能耗. 优化目标为制造期 C_{\max} 、总成本 W 与总能耗 E 的加权和. 其中: 制造期 C_{\max} 指工件 j 在第2阶段的完工时间 C_j^2 , 包括阶段间的运输时间; 总成本 W 涵盖第1阶段的外包成本 WC 以及阶段间的运输成本 TC ; 总能耗

E 包括两个阶段所有工件加工能耗 PE 和阶段间运输能耗 TE .

1.2 数学模型

该问题的参数以及决策变量定义如下.

参数:

I : 第1阶段的企业集合, 假设第1家企业为制造商, 其余为外包商, $i \in I = \{1, 2, \dots, |I|\}$, i 为企业索引;

J : 制造商的工件集合, $j \in J = \{1, 2, \dots, |J|\}$, j 为工件索引;

M^k : 在第 k 阶段的机器集合, $m \in M^k = \{1, 2, \dots, |M^k|\}$, $k = 1, 2$;

p_j^k : 工件 j 在第 k 阶段的加工时间, $\forall j \in J, k = 1, 2$;

$w_{j,m}$: 工件 j 在第1阶段外包给特定机器 m 的加工成本, $\forall j \in J, \forall m \in M^1$;

$d_{j,m}$: 第1阶段外包给特定机器 m 加工的工件 j 到第2阶段加工的运输距离, $\forall j \in J, \forall m \in M^1$;

v_m^k : 第 k 阶段机器 m 的处理速度, $\forall m \in M^k, k = 1, 2$;

e_m^k : 第 k 阶段机器 m 的单位加工能耗, $\forall m \in M^k, k = 1, 2$;

$p_{j,m}^k$: 工件 j 在第 k 阶段的机器 m 上的实际处理时间, $p_{j,m}^k = p_j^k/v_m^k, \forall j \in J, \forall m \in M^k, k = 1, 2$;

tv : 阶段间运输车辆的固定速度;

tc : 阶段间运输车辆的单位运输成本;

te : 阶段间运输车辆的单位运输能耗;

G : 一个足够大的整数.

决策变量:

$x_{j,m}^k$: 0-1 决策变量, 若工件 j 在阶段 k 的机器 m 上被处理, 则 $x_{j,m}^k = 1, \forall j \in J, \forall m \in M^k, k = 1, 2$;

$y_{j,j'}^k$: 0-1 决策变量, 第 k 阶段若工件 j 在工件 j' 之前加工, 则 $y_{j,j'}^k = 1, \forall j, j' \in J, j \neq j', k = 1, 2$;

C_j^k : 工件 j 在第 k 阶段的完成时间, $\forall j \in J, k = 1, 2$;

C_{\max} : 制造期 (最大完工时间);

WC : 制造商所有工件完工的总外包成本;

TC : 制造商所有工件完工的总运输成本;

PE : 制造商所有工件完工的总加工能耗;

TE : 制造商所有工件完工的总运输能耗;

W : 制造商所有工件完工的总成本;

E : 制造商所有工件完工的总能耗.

该问题的数学模型 \mathcal{P} 如下所示:

$$\min Z = \alpha C_{\max} + \beta W + \gamma E. \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m \in M^k} x_{j,m}^k = 1, \quad \forall j \in J, k = 1, 2; \quad (2)$$

$$p_{j,m}^1 x_{j,m}^1 \leq C_j^1, \quad \forall j \in J, \forall m \in M^1; \quad (3)$$

$$C_j^1 + x_{j,m}^1 \frac{d_{j,m}}{tv} + p_{j,m'}^2 x_{j,m'}^2 \leq C_j^2, \quad \forall j \in J, \\ \forall m \in M^1, \forall m' \in M^2; \quad (4)$$

$$C_j^k + x_{j',m}^k p_{j',m}^k - G(3 - y_{j,j'}^k - x_{j,m}^k - \\ x_{j',m}^k) \leq C_{j'}^k, \quad \forall j, j' \in J, j \neq j', \\ \forall m \in M^k, k = 1, 2; \quad (5)$$

$$C_{j'}^k + x_{j,m}^k p_{j,m}^k - G(2 + y_{j,j'}^k - x_{j,m}^k - \\ x_{j',m}^k) \leq C_j^k, \quad \forall j, j' \in J, j \neq j', \\ \forall m \in M^k, k = 1, 2; \quad (6)$$

$$C_j^2 \leq C_{\max}, \quad \forall j \in J; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M^k} x_{j,m}^k p_{j,m}^k e_m^k \leq PE, \\ k = 1, 2; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M^1} x_{j,m}^1 d_{j,m} * te \leq TE; \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M^1} x_{j,m}^1 w_{j,m} \leq WC; \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M^1} x_{j,m}^1 d_{j,m} * tc \leq TC; \quad (11)$$

$$PE + TE \leq E; \quad (12)$$

$$WC + TC \leq W; \quad (13)$$

$$x_{j,m}^k \in \{0, 1\}, y_{j,j'}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall j, j' \in J, \\ j \neq j', \forall m \in M^k, k = 1, 2; \quad (14)$$

$$C_{\max}, W, E, WC, TC, PE, TE \geq 0. \quad (15)$$

其中: 目标函数(1)表示最小化制造期 C_{\max} 、总成本 W 与总能耗 E 的加权和, α 、 β 和 γ 为介于0~1之间的权重因子, 通过AHP-熵值综合赋权法结合主观和客观因素来确定; 约束(2)表示每个工件 j 在阶段 k 必须分配到机器 m 上加工; 约束(3)保证第1阶段中每个工件的完工时间超过其在机器上的加工时间; 约束(4)表示工件在第1阶段完成后才能在第2阶段加工; 约束(5)和(6)描述了机器的容量限制, 对于在同一阶段的同一台机器上加工的两个工件, 下一个工件的加工只能在上一个工件加工完毕后才能开始; 约束(7)定义了制造期为所有工件的最大完工时间; 约束(8)为求解两个阶段所有工件加工的总能耗; 约束(9)计算了阶段间运输的总能耗; 约束(10)

和(11)分别计算阶段1的总外包成本和阶段间运输的总运输成本; 约束(12)和(13)定义了制造商所有工件完工的总能耗和总成本; 约束(14)和(15)定义了变量取值范围.

1.3 目标权重确定

由于目标中制造期 C_{\max} 、总成本 W 和总能耗 E 具有不同量纲, 为合理化权重设置, 引入AHP-熵值综合赋权法来确定目标权重. 其中: AHP(层次分析法)反映决策者主观对不同目标的重视程度, 熵值法从极值离散程度反映客观权重. 采用二者相结合的方式获得兼顾主客观因素的更为科学合理的目标权重系数. AHP-熵值综合赋权法具体实施步骤如下.

step 1: 确定层次分析法权重 w_j^1 . 采用指数标度法^[29], 根据决策者偏好两两比较制造期 C_{\max} 、总成本 W 与总能耗 E 的相对重要度, 构建判断矩阵. 求解矩阵的最大特征值和权重. 对判断矩阵进行一致性检验, 若检验指标小于0.1, 则矩阵具有一致性; 反之, 则对判断矩阵进行修正.

step 2: 确定熵值权重 w_j^2 . 对于任一规模下的给定算例, 分别求得最小化制造期 C_{\max} 、总成本 W 和总能耗 E 的3个单目标问题, 分别获得3个目标的最优解, 即理想点值, 并通过给定目标理想点值的解代入获得另外两个目标值, 形成初始的目标方案矩阵 $X = (x_{i,j})_{m \times n}$; 由于3个目标函数量纲不同且目标值越小越好, 需要对原始数据进行逆向化处理以去除量纲, 进而得到标准化矩阵 $R = (r_{i,j})_{m \times n}$, 计算公式如下所示:

$$r_{i,j} = \frac{\max(x_{i,j}) - x_{i,j}}{\max(x_{i,j}) - \min(x_{i,j})}, \quad \forall i \in m, \forall j \in n; \quad (16)$$

计算3种方案的无量纲化目标值 $r_{i,j}$ 在各目标 j 下的权重 $P_{i,j}$, 为避免数据中出现零值, 需要将目标值非负平移修正, 计算公式如下所示:

$$P_{i,j} = \frac{r_{i,j} + 0.01}{\sum_{j=1}^n (r_{i,j} + 0.01)}, \quad \forall i \in m; \quad (17)$$

对于 m 种方案 n 个目标, 第 i 种方案第 j 个目标的信息熵值为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{i,j} \cdot \ln P_{i,j}, \quad \forall j \in n; \quad (18)$$

目标 j 的熵值权重 w_j^2 为

$$w_j^2 = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}. \quad (19)$$

step 3: AHP-熵值综合权重 w_j . 由基于指数标度法的 AHP 得出主观权重 w_j^1 , 以及熵值法得出的差异客观权重 w_j^2 , 通过下式计算可获得各目标值的差异综合权重 w_j :

$$w_j = \frac{w_j^1 w_j^2}{\sum_{j=1}^n w_j^1 w_j^2}. \quad (20)$$

1.4 复杂性分析

定理 1 所研究的带外包选择的绿色混合流水车间调度问题是强 NP 难问题.

证明 假设所有机器的单位能耗和外包机器加工成本均为 0, 原问题可简化为传统的两阶段混合流水车间调度问题, 其目标是最小化制造期. 该简化的子问题已被证明是强 NP 难问题^[30]. 因此, 本文所研究的原问题也属于强 NP 难问题. □

2 算法设计

由前文可知, 本文所研究的问题属于 NP 难问题. 随着问题规模的扩大, 特别是在涉及外包成本以及能耗优化的情况下, 问题求解难度呈指数级上涨, 传统数学规划方法难以高效求解. 现有文献对传统混合流水车间问题提出了精确算法或近似算法, 但是, 缺乏考虑外包成本和能耗成本的混合流水车间问题的高效求解方法. 鉴于此, 本节拟结合问题特征, 为所研究问题设计了高效求解算法. 通过文献查阅, 发现约翰逊规则 (JR) 已被证明为求解优化制造期的流水车间调度问题的有效方法^[31]. 本文拟结合该规则与所研究问题特性, 开发高效两阶段启发式算法 (ETH).

所提出 ETH 算法基于分解的核心思想, 将原混合流水车间调度问题分为两个阶段相关联的并行机调度问题: 第 1 阶段综合考虑运输时间和外包成本等约束条件, 通过确定工件的加工顺序以及在内部机器和外包机器上的分配方案, 优化不相关并行机上的制造期、总成本以及总能耗的加权和. 其中: 能耗包括加工能耗和运输能耗, 外包成本包括外包机器的加工成本和运输成本, 如下文 step 1 ~ step 4 所示. 此阶段在满足阶段间优先关系的前提下, 提供每个工件在第 1 阶段的完工时间, 作为第 2 阶段调度的初始数据. 第 2 阶段针对不相关并行机在工件具有待到达时间下的调度问题, 进一步确定工件的加工顺序及其在内部机器上的分配, 优化制造期与总加工能耗的加权和, 最终完成整个流水车间调度问题的求解, 如下文 step 5 ~ step 7 所示. 通过两个阶段的优化, 最小化制造期、总成本和总能耗的加权和, 并在 step 8 输出.

基于规则的两阶段启发式算法具体步骤描述如下.

step 1: 第 1 阶段的数据初始化. 工件分配变量 $x_{j,m}^1 \leftarrow 0$, $J' \leftarrow J$, 第 1 阶段内外部机器的完工时间 $C_m \leftarrow 0$, 工件在第 1 阶段的完工时间 $C_j^1 \leftarrow 0$, $\forall j \in J, \forall m \in M^1$, 最大的完工时间 $C_{\max} \leftarrow 0$, 加权和目标增量 $\delta \leftarrow +\infty$.

step 2: 根据约翰逊规则 (JR) 预处理工件在第 1 阶段的加工顺序. 具体而言, 根据工件在两个阶段的处理时间 p_j^1 和 p_j^2 将工件分为两组. 其中: 组 1 中的工件满足 $p_j^1 \leq p_j^2$, 组 2 中的工件则满足 $p_j^1 > p_j^2$. 组 1 中的工件按照 p_j^1 的最短处理时间 (SPT) 规则进行排序, 组 2 中的工件则按照 p_j^2 的最长处理时间 (LPT) 规则进行排序. 在调度分配时, 优先考虑组 1, 其次是组 2. 在整个过程中, 要确保所有的工件均尽早处理.

step 3: 针对未加工的工件 $j(j \in J')$, 寻找第 1 阶段具有最小加权值增量 δ 的位置来分配机器. 由于第 1 阶段工件可以外包, 第 1 阶段应考虑总成本 (外包成本和运输成本) 和运输时间. 具体而言, 需要考虑以下两种情况: 对于未分配的工件, 循环第 1 阶段的每台机器, 若添加一个特定的工件不超过当前最大完工时间 C_{\max} , 则只需要考虑新增的总成本和能耗的加权值; 若超过当前最大完工时间, 则还应考虑额外增量 ΔC_{\max} .

step 3.1: 根据 step 2 中各工件的加工顺序依次找寻其在第 1 阶段中加权和目标最小增量的机器位置. 工件 j 分配到当前机器的完工时间为 $C_m + p_j^1/v_m^1 + d_{j,m}/tv$, 若当前的最大完工时间 $C_{\max} \geq C_m + p_j^1/v_m^1 + d_{j,m}/tv$, 则只需要考虑总成本和能耗的加权和增量, 选择目标增量最小的机器位置 m , 即更新 $\delta = \min \beta(w_{j,m} + d_{j,m} \cdot tc) + \gamma(e_m^1 p_j^1/v_m^1 + d_{j,m} \cdot te)$, 令 $m^* = m$.

step 3.2: 若当前的最大完工时间 $C_{\max} < C_m + p_j^1/v_m^1 + d_{j,m}/tv$, 则应考虑额外增量 ΔC_{\max} , $\Delta C_{\max} = C_m + p_j^1/v_m^1 + d_{j,m}/tv - C_{\max}$. 选择目标增量最小的机器位置 m , 即更新 $\delta = \min \alpha \Delta C_{\max} + \beta(w_{j,m} + d_{j,m} \cdot tc) + \gamma(e_m^1 p_j^1/v_m^1 + d_{j,m} \cdot te)$, 令 $m^* = m$.

step 3.3: 令 $x_{j,m^*}^1 = 1$, $J' = J' \setminus j$, 更新 $C_{m^*} = C_{m^*} + p_j^1/v_{m^*}^1$, $C_j^1 = C_{m^*} + x_{j,m^*}^1 d_{j,m^*}/tv$.

step 3.4: 若 $C_{\max} < C_{m^*}$, 则更新 $C_{\max} = C_{m^*}$.

step 4: 输出工件在第 1 阶段的分配变量 $x_{j,m}^1$.

step 5: 第 2 阶段的数据初始化. 总加权目标值 $Z \leftarrow 0$, 工件分配变量 $x_{j,m'}^2 \leftarrow 0$, 第 2 阶段内部机器的释放时间 $R_{m'} \leftarrow 0$, 工件在第 2 阶段的完工时

间 $C_j^2 \leftarrow 0, \forall j \in J, \forall m' \in M^2$. 加权和目标增量 $\delta \leftarrow +\infty$.

step 6: 根据工件在第 1 阶段的完成时间 C_j^1 , 按照先到先服务 (FCFS) 规则对工件进行排序. 具体而言, 工件按照第 1 阶段的完工时间 C_j^1 升序排序. 若多个工件具有相同的完工时间, 则优先考虑第 2 阶段加工时间 p_j^2 较长的工件加工.

step 7: 第 2 阶段的机器分配, 类似于 step 3. 在第 2 阶段, 只需要考虑完工时间和能耗加权增量目标. 在机器分配期间, 必须首先确定第 2 阶段机器上工件的最早允许加工时间 $R_{m'}$, 然后选择加权目标增量最小的机器进行处理. 若增加一个特定工件后不超过当前的最大完工时间 C_{\max} , 则只需要考虑能耗的增量; 若超过当前最大完工时间, 则需要考虑额外增量 ΔC_{\max} . 最早可用机器 (FAM) 规则指出, 最早允许的加工时间为第 2 阶段机器释放时间 $R_{m'}$ 与工件完工时间 C_j^1 间的最大值, 即 $A_{m'} = \max\{R_{m'}, C_j^1\}$.

step 7.1: 根据 step 6 中各工件的加工顺序依次找寻其在第 2 阶段中加权和目标最小增量的机器位置. 若 $C_j^1 \geq R_{m'}$, 则令 $A_{m'} = C_j^1$. 工件 j 分配到当前机器的完工时间为 $A_{m'} + p_j^2/v_{m'}^2$, 若当前的最大完工时间 $C_{\max} \geq A_{m'} + p_j^2/v_{m'}^2$, 则只需要考虑能耗的加权增量, 选择目标增量最小的机器位置 m' , 即更新 $\delta = \min \gamma(e_{m'}^2 p_j^2/v_{m'}^2)$, 令 $m'^* = m'$.

step 7.2: 若当前的最大完工时间 $C_{\max} < A_{m'} + p_j^2/v_{m'}^2$, 则应考虑额外增量 ΔC_{\max} , $\Delta C_{\max} = A_{m'} + p_j^2/v_{m'}^2 - C_{\max}$. 选择目标增量最小的机器位置 m' , 即更新 $\delta = \min \alpha \Delta C_{\max} + \gamma(e_{m'}^2 p_j^2/v_{m'}^2)$, 令 $m'^* = m'$.

step 7.3: 若 $C_j^1 < R_{m'}$, 则令 $A_{m'} = R_{m'}$. 重复 step 7.1 和 step 7.2.

step 7.4: 令 $x_{j,m'^*}^2 = 1$, 更新 $R_{m'^*} = A_{m'^*} + p_j^2/v_{m'^*}^2$, $C_j^2 = A_{m'^*} + p_j^2/v_{m'^*}^2$.

step 7.5: 若 $C_{\max} < R_{m'^*}$, 则更新 $C_{\max} = R_{m'^*}$.

step 8: 输出工件在第 2 阶段的分配变量 $x_{j,m}^2$ 以及计算所研究问题的总加权目标值 Z .

定理 2 两阶段启发式算法 ETH 的时间复杂度为 $O(\max(J \log J, JM^1, JM^2))$.

证明 两阶段启发式算法 ETH 第 1 阶段中工件 JR 排序复杂度为 $O(J \log J)$, 工件分配复杂度为 $O(JM^1)$, 则第 1 阶段的复杂度为 $O(\max(J \log J, JM^1))$; 第 2 阶段中工件 FCFS 排序复杂度为 $O(J \log J)$, 工件分配复杂度为 $O(JM^2)$, 则第 2 阶

段计算复杂度为 $O(\max(J \log J, JM^2))$, 因此, ETH 算法的时间复杂度为 $O(\max(J \log J, JM^1, JM^2))$.

3 仿真实验与分析

为评估所提出算法的性能, 所提出模型和所提出算法以 C++ 编码于 Visual studio 2022 实现, 所提出模型由商业优化软件 CPLEX (version 12.10) 求解. 实验在 CPU 为 1.19 GHz、RAM 为 16.0 GB 的 PC 机上进行, 所有算例求解时间限于 3 600 s.

3.1 上界求解方法

根据预测试结果, 由于所研究问题的复杂性, 采用商业优化软件求解问题的规模十分有限. 为有效评价所提出算法在大规模问题的求解效果, 提出了一类广泛应用于生产调度问题的舍入启发式 (RH) 算法, 为问题求解提供高质量上界. 其基本原理是通过求解线性松弛模型获得连续解, 然后采取合适的舍入规则将其转换为可行的整数解, 最后检验可行性并调整解以满足约束条件从而实现近似最优^[32]. 该方法计算效率高, 适用于多机调度、流水车间调度等复杂问题. 其具体步骤如下.

step 1: 变量松弛、求解.

将两个三维 0-1 决策变量 $x_{j,m}^k$ 、 $y_{j,j'}^k$ 进行线性松弛, 即 $0 \leq x_{j,m}^k \leq 1, 0 \leq y_{j,j'}^k \leq 1, \forall j, j' \in J, j \neq j', \forall m \in M^k, k = 1, 2$, 建立松弛模型 \mathcal{P}' . 创建两个三维数组 $x\text{Values}_{j,m}^k$ 、 $y\text{Values}_{j,j'}^k$ 存储松弛模型求解后的连续解.

step 2: 舍入规则.

step 2.1: 针对松弛解 $x\text{Values}_{j,m}^k$ 的舍入, 遍历某个特定工件 j 在某个阶段 k 上的松弛解, 找到最大值对应的机器索引 m' , 将该机器对应的变量设为 1, 其他设为 0, 即 $x\text{Values}_{j,m'}^k = 1, x\text{Values}_{j,m}^k = 0, m \in M^k \setminus \{m'\}$.

step 2.2: 针对松弛解 $y\text{Values}_{j,j'}^k$ 的舍入, 不需要判断同一阶段工件间的优先加工顺序, 只需要比较同一阶段同一台机器上加工的工件的 $y\text{Values}$. 具体而言, 通过 $x\text{Values}_{j,m}^k$ 值判断在同一阶段同一台机器上加工的工件, 创建一维数组 Lab_j 来标记这些工件, 初始化标签, 并确定工件总数. 比较同一阶段同一台机器上加工的工件 a 和 b 的 $y\text{Values}$ 值来确定两两工件间的加工顺序. 若

$$y\text{Values}_{\text{Lab}_a, \text{Lab}_b}^k > y\text{Values}_{\text{Lab}_b, \text{Lab}_a}^k \text{ or}$$

$$y\text{Values}_{\text{Lab}_b, \text{Lab}_a}^k = y\text{Values}_{\text{Lab}_b, \text{Lab}_a}^k$$

且 $p_{\text{Lab}_a}^k < p_{\text{Lab}_b}^k$, 则令

$$y\text{Values}_{\text{Lab}_a, \text{Lab}_b}^k = 1, y\text{Values}_{\text{Lab}_b, \text{Lab}_a}^k = 0.$$

为避免出现矛盾, 还需要比较同一阶段同一机器上工件 c 与工件 a 、工件 b 的 $yValues$ 值的关系以确保排序的一致性. 即若

$$yValues_{Lab_a, Lab_c}^k = 1, yValues_{Lab_c, Lab_b}^k = 1,$$

则

$$yValues_{Lab_a, Lab_b}^k = 1, yValues_{Lab_b, Lab_a}^k = 0;$$

反之, 若

$$yValues_{Lab_a, Lab_c}^k = 0, yValues_{Lab_c, Lab_b}^k = 0,$$

则

$$yValues_{Lab_b, Lab_a}^k = 1, yValues_{Lab_a, Lab_b}^k = 0.$$

step 3: 更新模型并重新求解.

将舍入后的变量值更新到模型中, 求解所研究问题的制造期 C_{max} 以及总加权目标值 Z . 对于 C_{max} 的求解, 首先基于约束 (3) 计算出工件在第 1 阶段的初始完工时间值 C_j^1 . 然后考虑工件加工顺序的约束, 根据舍入后的 $yValues_{j,j'}^1$ 值更新完工时间 C_j^1 . 类似地, 根据约束 (4), 计算每个工件在第 2 阶段的初始完工时间 C_j^2 , 通过 $yValues_{j,j'}^2$ 值确定加工顺序, 更新完工时间 C_j^2 . 计算最大完工时间 $C_{max} = \max\{C_j^2\}$. 最后, 使用舍入后的 $xValues_{j,m}^k$ 值, 计算总加权目标值 Z .

3.2 实验设计

为评估所提出方法的性能, 设计了小、大两组规模的测试实例. 测试实例的参数设置如下: 工件在两个阶段的加工时间 $p_j^k = DU[10, 100]$, 机器的加工速度 (加工能耗) $v_m^k = DU[1, 10]$ ($e_m^k = DU[1, 5]$); 运输车辆的运输速度 (运输能耗、单位运输成本) $tv = DU[1, 10]$ ($te = DU[0.05, 0.2]$, $tc = DU[0.1, 1]$); 工件在外包机器的加工成本 $w_{j,m} = DU[20, 50]$, 运输距离 $d_{j,m} = DU[5, 30]$. 数据格式 $DU[a, b]$ 表示介于 a 与 b 间的离散均匀分布.

为评估所提出算法与最优值和上界值间的差距, 引入了 GAP 作为度量指标. 具体而言, $G_1(100\%)$ 表示 MILP 解与 RH 解间的差异. 类似地, $G_2(100\%)$ ($G_3(100\%)$) 表示 ETH 解与 MILP 解 (RH 解) 间的差异, 计算公式如下所示:

$$G_1 = (\text{Obj}(\text{RH}) - \text{Obj}(\mathcal{P}))/\text{Obj}(\mathcal{P}), \quad (21)$$

$$G_2 = (\text{Obj}(\text{ETH}) - \text{Obj}(\mathcal{P}))/\text{Obj}(\mathcal{P}), \quad (22)$$

$$G_3 = (\text{Obj}(\text{RH}) - \text{Obj}(\text{ETH}))/\text{Obj}(\text{RH}). \quad (23)$$

3.3 结果分析

表 1 和表 2 分别为小规模、大规模的实验结果. 其中: Obj 为各方法所求得的目标值, CT 为计算时

间. 为便于结果对比, 表 1 中 CPLEX 所获得的最优解以粗体显示. 同时, 在表 1 和表 2 的差距指标 $G_3(100\%)$ 中添加“优于 RH”的标明, 以更直观地呈现 ETH 与 RH 在解质量上的优劣性. 算例的大小规模以是否能够通过模型求解获得精确解来划分. 小规模算例结果展示了由 CPLEX 求解获得最优解的情况, 通过将 RH 和 ETH 的解与最优解的比较, 评估 RH 算法所得上界的质量, ETH 解的质量以及 ETH 解与 RH 上界值的差距. 大规模算例结果展示了无法直接求解模型获得最优解的情况下, ETH 解对 RH 上界值的改进.

根据决策者的偏好分析, 制造期与总成本的重要性相当, 且均比总能耗稍微重要. 据此计算得到基于指数标度的 AHP 初始主观权重分别为 $\alpha = 0.3880$, $\beta = 0.3880$, $\gamma = 0.2240$. 然后, 通过计算每个算例的极值点, 获得相应的熵值客观权重. 值得注意的是, 不同算例的熵值权重存在一定差异. 最后, 结合主观权重与客观权重, 得出每个小规模算例的最终差异综合权重.

表 1 给出了 MILP 模型和各算法在小规模算例上的计算对比结果. 由表 1 可以发现, 在相同机器规模下, 随着工件数的增加, 以及在相同工件规模下, 随着机器数的增加, 模型 \mathcal{P} 的计算时间 CT 均增加. 传统启发式 RH 算法, 通过松弛整数变量后再舍入, 可以在较短的时间内获得可行解, 其目标值与最优解的差距 $G_1(100\%)$ 在 3.87% ~ 15.86% 间波动, 平均差距为 9.90%. 然而, RH 算法解的质量有限, 难以进一步接近最优解. 因此, 有必要开发更高效的算法, 在保证计算效率的同时获得更优的解质量.

根据定理 2 可知, ETH 算法时间复杂度为 $O(\max(J \log J, JM^1, JM^2))$, 能够在 1 s 内快速获得可行解, 计算效率较高. 其与模型 \mathcal{P} 所得最优解的平均差距 $G_2(100\%)$ 为 1.72%. 通过基于问题特征的迭代贪心策略, ETH 算法有效地提高了解的质量. 与 RH 算法相比, ETH 算法的解质量更优, 平均改进幅度 $G_3(100\%)$ 为 7.37%. 这些结果表明, ETH 算法在性能上具有显著优势.

CPLEX 在限制时间 3 600 s 内无法求得极值点, 因此, 无法计算大规模算例的熵值权重. 所提出算法在对解的改进中均有纳入权重考量, 在差异权重的小规模实例问题求解中表现良好. 因此, 大规模算例的目标权重采用了所有小规模算例各目标差异权重的平均值, 即 $\alpha = 0.3663$, $\beta = 0.4035$, $\gamma = 0.2302$.

由表 2 的大规模实例计算结果可以看出, 由于

表1 小规模实例计算结果

M^1	M^2	J	\mathcal{P}		RH		ETH			
			Obj	CT/s	Obj	$G_1/\%$	Obj	CT/s	$G_2/\%$	G_3 (优于RH)/%
3	2	5	201.78	0.51	224.02	11.02	205.12	<1	1.65	8.44
		8	203.50	85.39	217.17	6.72	203.54	<1	0.02	6.28
		15	663.10	3 600	714.85	7.80	678.05	<1	2.26	5.15
4	3	5	142.65	0.61	156.12	9.44	145.47	<1	1.98	6.82
		8	217.77	99.41	242.92	11.55	223.34	<1	2.56	8.06
		15	481.83	3 600	558.25	15.86	491.72	<1	2.05	11.92
5	4	5	128.60	0.74	146.42	13.86	131.56	<1	2.30	10.15
		8	184.27	146.83	200.42	8.76	186.71	<1	1.03	7.11
		15	390.71	3 600	427.73	9.48	398.73	<1	2.05	6.78
5	2	8	284.98	12.47	316.26	10.98	287.55	<1	0.90	9.08
		15	481.49	3 600	500.13	3.87	487.15	<1	1.17	2.60
		30	986.02	3 600	1 040.36	5.51	1 004.64	<1	1.89	3.43
6	3	8	176.96	87.60	194.91	10.15	177.91	<1	0.54	8.72
		15	402.75	3 600	442.92	9.97	407.23	<1	1.11	8.06
		30	805.40	3 600	855.32	6.20	827.26	<1	2.71	3.28
7	4	8	158.96	324.50	170.40	7.20	162.81	<1	2.42	4.45
		15	288.88	3 600	333.53	15.45	296.39	<1	2.60	11.14
		30	765.30	3 600	875.82	14.44	778.11	<1	1.67	11.16
avg.			386.94	1 842.29	423.20	9.90	394.04	<1	1.72	7.37

表2 大规模实例计算结果

M^1	M^2	J	\mathcal{P}		RH		ETH			
			Obj(n)	CT/s	Obj	CT/s	Obj(n)	Obj	CT/s	G_3 (优于RH)/%
15	3	80	2 161.66(3)	3 600	2 520.28	1.66	2 160.98(3)	2 317.65	0.11	8.04
		150	—	3 600	5 900.02	8.38	—	5 583.96	0.33	5.36
		300	—	3 600	10 037.3	21.39	—	9 157.98	0.58	8.76
20	5	80	1 727.59(4)	3 600	1 965.64	2.30	1 661.10(4)	1 880.68	0.46	4.32
		150	—	3 600	4 576.96	10.68	—	3 982.61	1.02	12.99
		300	—	3 600	7 780.55	36.51	—	7 258.49	1.34	6.71
30	7	80	1 172.83(4)	3 600	1 337.94	3.72	1 180.02(4)	1 246.23	0.93	6.85
		150	—	3 600	2 718.01	19.42	—	2 559.4	1.70	5.84
		300	—	3 600	5 281.08	51.12	—	4 427.92	2.94	16.16
30	5	80	1 730.47(4)	3 600	2 048.16	3.58	1 718.49(4)	1 796.1	0.85	12.31
		150	—	3 600	4 440.86	19.15	—	4 024.15	1.41	9.38
		300	—	3 600	7 627.86	48.33	—	6 983.02	1.82	8.45
40	7	80	1 977.69(3)	3 600	1 797.55	4.96	1 996.05(3)	1 624.04	1.06	9.65
		150	—	3 600	4 755.28	57.67	—	3 781.24	1.54	20.48
		300	—	3 600	5 763.28	68.51	—	5 449.76	2.56	5.44
60	10	80	—	3 600	1 538.51	7.56	—	1 367.1	1.07	11.14
		150	—	3 600	2 940.78	92.50	—	2 695.76	3.54	8.33
		300	—	3 600	5 447.4	108.53	—	5 170.4	4.97	5.08
avg.			1 754.69	3 600	4 359.86	31.47	1 743.33	3 961.47	1.57	9.18

注: n 表示同一规模下同时运行5个实例中CPLEX求解模型能够获得上界值的实例数, Obj(n)表示 n 个实例的平均值.

问题复杂度较高,模型 \mathcal{P} 在限制时间3 600 s内无法获得最优解,仅部分算例求得符合整数约束的可行上界,见Obj(n)列,其中 n 为CPLEX求得了可行上界值的算例数量.为便于结果对比,在表2中列出了ETH算法求得对应算例的上界值.如:针对算例15-3-80,CPLEX获得3个算例的平均上界值Obj(n)为2 161.66,ETH算法求解得到的对应算例目标值为

2 160.98.总体上,在具备可行解的算例中,CPLEX获得上界的总体平均值为1 754.69,ETH算法获得的平均值为1 743.33,即ETH的解平均优于CPLEX的上界值0.6%.其余算例中,CPLEX无法提供有效上界.这表明了模型 \mathcal{P} 在处理大规模问题时的局限性.为进一步验证大规模问题上ETH算法的性能,将其与RH算法对比.

对比结果表明, ETH 算法在计算效率和解质量方面均优于 RH 算法. RH 算法的平均计算时间为 31.47 s, 且在问题规模超过 60-10-300 时, 因需要存储大量中间变量并进行舍入操作, 出现内存溢出, 无法提供有效解. 相比之下, ETH 算法的平均计算时间为 1.57 s, 始终能够稳定输出可行解, 求解效果远优于 RH 算法, 平均改进幅度达到 9.18%. 规模为 40-7-150 时, 差距高达 20.48%. 可见, ETH 算法在不同问题规模下均具有稳定的求解性能.

ETH 算法相比于 RH 算法性能更好的机理主要体现在以下几个方面: 1) 应用了经典调度规则: 第 1 阶段使用约翰逊规则 (JR) 对工件进行分组和排序, 有助于减少处理时间, 进而缩短了总加工时间; 第 2 阶段使用先到先服务规则 (FCFS) 并结合机器释放时间和工件第 1 阶段完成时间, 确保工件在第 2 阶段尽早处理. 此外, 最早可用机器 (FAM) 规则确保机器尽可能早地开始加工, 减少了空闲时间, 提高了整体效率. 2) 设计了高效的工件分配局部搜索策略: ETH 算法在工件分配时, 基于贪心思想, 在每个阶段采用局部搜索而非全局搜索, 以节省求解时间. 同时, 通过计算考虑权重的目标增量最小 (δ 最小) 的位置, 逐步优化调度方案, 能够有效改进解的质量. 此外, 引入了 ΔC_{\max} 约束, 确保局部优化策略兼顾各机器工件负载的均衡分配. 3) ETH 算法具有多项式时间复杂度, 能够高效求解各种规模问题. 因此, 整体上, ETH 算法在性能上具有显著优势.

4 结 论

本文针对包含工序外包、阶段间运输和能耗约束的两阶段混合流水车间问题, 提出了一种新优化调度方法. 构建了以最小化制造期、总成本以及总能耗加权和为目标的混合整数线性规划模型, 并采用了基于指数标度的 AHP-熵值综合赋权法确定各目标的权重参数. 虽然该模型对于小规模问题有效, 但是在大规模情况下难以求解. 为此, 本文设计了一种基于问题特征的两阶段启发式算法 (ETH), 并与传统舍入启发式算法 (RH) 进行了对比. 小规模实验结果表明, ETH 算法计算时间稳定在 1 s 内, 且解的精度接近最优. 大规模实验结果进一步表明了 ETH 算法远优于 RH 算法, 平均目标值降低了 9.18%. 总体上, 对于不同规模问题, ETH 算法在计算效率和解质量方面均展现出较高稳定性.

本文在理论上研究了一类考虑生产效率、经济效益和能耗成本的调度问题, 提出了一类新的整数线性规划模型和算法, 丰富了调度理论的研究内容; 在实践上, 为制造企业在平衡环境成本与经济效益方面提供了重要指导, 具有实际应用价值. 未来研究

方向: 1) 从机器环境上, 可将本研究扩展至具有更多阶段的混合流水车间, 或开放车间等; 2) 可以拓展考虑更复杂的工件特性, 如工件到达时间、交货期等; 3) 可拆分目标, 通过求解多目标优化问题为管理者提供更多决策方案参考; 4) 考虑更多环境因素, 如机器维修、批加工环境等; 5) 可进一步探索所研究问题的精确算法, 现有启发式算法能够为精确算法的开发提供高质量上界.

参考文献 (References)

- [1] U. S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2023[EB/OL]. (2023-10-11)[2025-06-08]. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/narrative/index.php>.
- [2] Jiang Y W, Tang X L, Li K, et al. Approximation algorithms for bi-objective parallel-machine scheduling in green manufacturing[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176: 108949.
- [3] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. *控制与决策*, 2018, 33(3): 385-391. (Wang L, Wang J J, Wu C G. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 385-391.)
- [4] Mokhtari H, Abadi I N K, Amin-Naseri M R. Production scheduling with outsourcing scenarios: A mixed integer programming and efficient solution procedure[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(19): 5372-5395.
- [5] Gupta J N. Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1988, 39(4): 359-364.
- [6] Wei Q, Wu Y, Jiang Y W, et al. Two-machine hybrid flowshop scheduling with identical jobs: Solution algorithms and analysis of hybrid benefits[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2019, 70(5): 817-826.
- [7] Wang S, Kurz M, Mason S J, et al. Two-stage hybrid flow shop batching and lot streaming with variable sublots and sequence-dependent setups[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(22): 6893-6907.
- [8] Zheng S, He Z W, Yang Z, et al. Effective upper and lower bounds for a two-stage reentrant flexible flow shop scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2023, 153: 106183.
- [9] Fan B B, Yang W W, Zhang Z F. Solving the two-stage hybrid flow shop scheduling problem based on mutant firefly algorithm[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10: 979-990.
- [10] Liu S, Pei J, Cheng H, et al. Two-stage hybrid flow shop scheduling on parallel batching machines considering a job-dependent deteriorating effect and non-identical job sizes[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 84: 105701.
- [11] 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[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 241-248.

- (Lei D M, Wang T. An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 241-248.)
- [12] 王移民, 雷德明. 求解分布式两阶段混合流水车间调度的反馈人工蜂群算法[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(6): 1137-1146.
(Wang Y M, Lei D M. A feedback-based artificial bee colony algorithm for solving distributed two-stage hybrid flow shop scheduling[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(6): 1137-1146.)
- [13] Mansouri S A, Aktas E, Besikci U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 772-788.
- [14] Wang S J, Wang X D, Chu F, et al. An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(8): 2283-2314.
- [15] Zheng X, Zhou S C, Xu R, et al. Energy-efficient scheduling for multi-objective two-stage flow shop using a hybrid ant colony optimisation algorithm[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(13): 4103-4120.
- [16] Dong J, Ye C M. Green scheduling of distributed two-stage reentrant hybrid flow shop considering distributed energy resources and energy storage system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108146.
- [17] Xue L, Wang X L. A multi-objective discrete differential evolution algorithm for energy-efficient two-stage flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 133: 109946.
- [18] Wang X Y, Chu F, Ren T, et al. Bi-objective optimization of a flow shop scheduling problem under time-of-use tariffs[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 7679-7695.
- [19] 王静, 雷德明. 考虑批处理机的绿色模糊混合流水车间调度问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(10): 3413-3421.
(Wang J, Lei D M. Research on energy-efficient fuzzy hybrid flow shop scheduling with batch processing machines[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(10): 3413-3421.)
- [20] Kim E S, Lee I S. Scheduling of two-machine flowshop without sourcing lead-time[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 145: 105864.
- [21] Kim E S, Lee I S. Heuristic approaches for scheduling of a two-machine flowshop with outsourcing lead-time[J]. *Engineering Optimization*, 2024, 56(12): 2431-2449.
- [22] 陈光亨, 陈蕾, 张安, 等. 可转包两台流水作业机排序的近似算法[J]. *运筹学学报*, 2016, 20(4): 109-114.
(Chen G T, Chen L, Zhang A, et al. Approximation algorithms for two-machine flow shop scheduling with an outsourcing option[J]. *Operations Research Transactions*, 2016, 20(4): 109-114.)
- [23] 刘乐, 朱洪利. 双机流水车间外包与调度联合优化问题的混合变邻域搜索算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1202-1222.
(Liu L, Zhu H L. Hybrid variable neighborhood search algorithm for two-machine flow shop outsourcing and scheduling integrated optimization problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1202-1222.)
- [24] Liu L. Outsourcing and rescheduling for a two-machine flow shop with the disruption of new arriving jobs: A hybrid variable neighborhood search algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 130: 198-221.
- [25] Lee K, Choi B C. Two-stage production scheduling with an outsourcing option[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 213(3): 489-497.
- [26] Jiang X J, Zhang A, Chen Y, et al. An improved algorithm for a two-stage production scheduling problem with an outsourcing option[J]. *Theoretical Computer Science*, 2021, 876: 59-69.
- [27] 李琳. 带有外包考虑的两阶段流水车间生产调度优化问题[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(5): 75-81.
(Li L. Production scheduling for two-stage flowshop without sourcing allowed[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(5): 75-81.)
- [28] Ahmadizar F, Amiri Z. Outsourcing and scheduling for a two-machine flow shop with release times[J]. *Engineering Optimization*, 2018, 50(3): 483-498.
- [29] 侯岳衡, 沈德家. 指数标度及其与几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 1995, 15(10): 43-46.
(Hou Y H, Shen D J. Index number scale and comparison with other scales[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 1995, 15(10): 43-46.)
- [30] Hoogeveen J A, Lenstra J K, Veltman B. Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 89(1): 172-175.
- [31] Guinet A, Solomon M M, Kedia P K, et al. A computational study of heuristics for two-stage flexible flowshops[J]. *International Journal of Production Research*, 1996, 34(5): 1399-1415.
- [32] Thanh P N, Péton O, Bostel N. A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 59(4): 964-975.

作者简介

程俊恒 (1988-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为运筹优化、供应链管理、生产调度, E-mail: junheng.cheng@fjnu.edu.cn;

程静雅 (1999-), 女, 硕士生, 主要研究方向为运筹优化、生产调度, E-mail: jingyacheng2022@126.com;

黄宇枫 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为供应链金融、运筹优化, E-mail: shulan996@163.com;

林艳泓 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为供应链金融、运筹优化, E-mail: yanhonglin0518@163.com.