

控制与决策

Control and Decision

带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法

轩华, 郑倩倩, 李冰

引用本文:

轩华, 郑倩倩, 李冰. 带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 565–576.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0835>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题](#)

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

[基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度](#)

Multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(2): 303–313 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0549>

[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>

[考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题](#)

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法

轩 华[†], 郑倩倩, 李 冰

(郑州大学 管理工程学院, 郑州 450001)

摘要: 研究每阶段含不相关并行机的多阶段混合流水车间问题(MHFSP), 工件的加工时间取决于所分配的机器, 相邻阶段之间缓冲区能力有限. 鉴于直接求解该NP-hard问题较为困难, 将其转化为带阻塞和不相关并行机的MHFSP(BMHFSP-UPM), 建立整数规划模型, 基于遗传算法(GA)和禁忌搜索(TS)提出一种混合启发式算法(HH-GA&TS)进行求解. 在该算法中, 设计基于多阶段并行加工的二维矩阵编码方案, 继而基于二维矩阵元胞组的初始解群体表述设计参数自适应策略; 引入基于工件位-基因位的单点倒置交叉以及基于机器号的单点变异过程, 利用GA求解机制完成解更新过程; 设计机器号次序交换(MNE)、工件位置交换(JNE)、工件工序变异(JNM)三种邻域解移动规则, 从而完成基于MNE-JNE-JNM的TS二次优化. 仿真实验测试了多达120个工件的720组不同规模实例, 结果表明, 相较于GA、TS及NEH-IGA, 所提出的混合启发式算法在解的质量方面表现更佳.

关键词: 多阶段混合流水车间; 有限缓冲; 不相关并行机; 最小化最大完工时间; 混合启发式算法

中图分类号: TB49

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0835

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 轩华, 郑倩倩, 李冰. 带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 565-576.

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

XUAN Hua[†], ZHENG Qian-qian, LI Bing

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A multi-stage hybrid flow shop problem (MHFSP) is studied with unrelated parallel machines at each stage, where job processing time depends on the assigned machine and the buffer capacity between adjacent production stages is limited. Because it is very difficult to solve this NP-hard problem directly, the original problem is transformed to the MHFSP with blocking and unrelated parallel machines (BMHFSP-UPM). An integer programming model is formulated, and a hybrid heuristic algorithm (HH-GA&TS) is then proposed to handle it based on the genetic algorithm (GA) and tabu search (TS). In this algorithm, a two-dimensional matrix coding scheme based on multi-stage parallel production is designed. A self-adaptive strategy of parameters is then developed according to the formulation of the initial solutions using a two-dimensional matrix cell group. Two single-point inverted crossover procedures using job location and gene location are designed, and a single-point mutation procedure using machine number is introduced, so that the GA is applied to update solutions. Finally, the three moving rules of neighborhood solutions are designed: Sequence exchange of machine number (MNE), exchange of job location (JNE), operation mutation of jobs (JNM). Thus the re-optimization process of TS using MNE-JNE-JNM is completed. Simulation experiments are performed on 720 different sized instances with up to 120 jobs. The results show that the hybrid algorithm can find a better quality schedule compared with the GA, the TS and the NEH-IGA.

Keywords: multi-stage hybrid flow shop; finite buffers; unrelated parallel machines; minimization of maximal completion time; hybrid heuristic algorithm

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1804151, U1604150).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: hxuan@zzu.edu.cn.

0 引言

混合流水车间问题(hybrid flow shop problem, HFSP)在工业生产中较为常见,它是流水车间问题的延伸,由两个或两个以上的生产阶段构成,至少有一个生产阶段有多台并行机^[1].传统HFSP常假设相邻生产阶段间的缓冲区是无限大的,然而,在许多实际生产过程中,缓冲区的存储能力往往是有限的,因而当下一阶段的机器处于繁忙状态时,前一阶段加工完成的工件则需送至缓冲区,这类问题在钢铁、化工、制药等领域有着广泛的应用^[2].如钢铁生产的连铸-热坯装炉模式,介于连铸与热轧阶段之间的保温坑可以减少热坯的温降,但其存储能力有限.而车间内机器的磨损程度、使用年限以及寿命长短等又会使得同一生产阶段的并行机虽执行同一加工任务,但加工时间却有所不同,较新的机器一般需要较短的加工时间即可完成同一工序的加工.因此,形成了本文所研究的每阶段含不相关并行机且缓冲能力受限的多阶段HFSP(multi-stage hybrid flow shop problem with unrelated parallel machines and finite buffers, MHFSP-UPM&FB).因HFSP是NP-hard^[3]的,故更复杂的MHFSP-UPM&FB也是NP-hard问题.

对于含同构并行机的HFSP,文献[4]基于模拟退火、遗传算法(genetic algorithm, GA)和局域搜索提出了一种混合算法以最小化最大完工时间和总拖期的凸组合;文献[5]针对一些阶段被忽略的情况,以makespan为目标函数提出了一些分派规则和改进启发式算法;文献[6]考虑机器准备时间和阻塞,提出了构造式启发式算法和一些优先级规则以最小化makespan;文献[7-8]考虑可重入车间环境,分别提出了求解makespan和总拖期的双目标调度的帕累托遗传算法,求解makespan的单目标调度的启发式算法和超启发式算法;文献[9]考虑交货时间窗,提出了迭代搜索方法以最小化总加权提前和拖期;文献[10]针对部分工序为组批加工方式的情况,提出了自适应协同进化紧致GA最小化makespan.

对于HFSP-UPM,为解决两阶段makespan问题,文献[11]探讨了阶段间有共享的可再生资源的抢先调度,提出了启发式算法;文献[12]考虑无等待限制、顺序相关调整时间和准备时间,结合模拟退火、变邻域搜索和遗传算法提出了基于帝国竞争算法的混合算法.对于3阶段makespan问题,文献[13]假设第2阶段有成组约束,提出了10种近似算法.对于多阶段问题,文献[14]针对能量意识HFSP-UPM提出了改进GA以最小化总能量消耗;文献[15]研究带机器

合格性约束的HFSP,提出了GA最小化总拖期.为最小化makespan,文献[16-18]分别提出了拉格朗日松弛算法、混合分布估计算法和改进贪婪遗传算法;文献[19]提出了两个超启发式算法以解决带释放时间和机器人运输的情况;文献[20]考虑机器人运输、释放时间和阻塞,提出了蚁群优化和GA;文献[21]考虑可重入特性,提出了两个启发式算法以最小化makespan和总拖期;文献[22]从薄饼生产过程中提炼出带调整时间的HFSP-UPM,提出了一种双目标GA以最小化makespan和能量消耗.

根据中间存储策略,机器环境可以分为无限中间缓冲^[23]、有限中间缓冲^[24]、无中间缓冲^[25]和零等待^[26].对于HFSP-FB,文献[27]针对从金属加工业的实际生产中提炼出的阶段1有一台机器而阶段2有两台非同构并行机的两阶段离散随机问题,提出了一种基于变邻域搜索的超启发式算法以最小化机器1的平均期望利用率、缓冲器的平均期望利用率和平均期望完成时间;文献[12]研究了缓冲能力为零的情况,即无等待限制,应用基于帝国竞争算法的混合算法以最小化makespan;文献[28]将阶段1有并行机而阶段2有一台机器的两阶段问题转化为无等待的3阶段HFSP,设计了启发式算法以最小化makespan.为解决多阶段问题,文献[29]提出了改进帝国竞争算法以最小化makespan;文献[30]以最小化makespan为目标,设计了一种基于GA和模拟退火算法的混合求解算法;文献[31]研究带机器可用性约束的周期调度,提出了启发式和超启发式算法以最小化周期时间;文献[32]考虑带顺序相关调整时间的双目标问题,即同时最小化makespan和总拖期,基于GA提出了一种改进算法.

就目前所查阅的文献来看,关于HFSP的研究对不同并行机环境均进行了较多探讨,已有的HFSP-UPM研究多假设相邻生产阶段间中间存储能力是无限的,而在缓冲区能力有限的条件下研究HFSP-UPM更贴近实际生产,但这类研究较为欠缺,上述文献[12, 27]仅探讨了两阶段问题.对此,本文提出一种更具有挑战性和实用性的MHFSP-UPM&FB,将存储能力为 B_j 的第 j 个缓冲区视为 B_j 台加工时间为零的离散机,从而将原问题转化为带阻塞的MHFSP-UPM.就优化算法而言,求解HFSP-UPM的方法主要为智能优化算法,如文献[20]利用单独的蚁群优化和GA求解含阻塞的HFSP-UPM.但关于混合算法(如基于GA的混合启发式算法)求解这类问题的研究还较少,而混合算法通常能改善搜索的广度和深度.因

此,本文引入遗传参数自适应策略,基于遗传算法和禁忌搜索提出一种混合启发式算法(hybrid heuristic based on genetic algorithm and tabu search, HH-GA& TS)近似求解该问题.

1 MHFSP-UPM&FB模型建立

1.1 问题描述

本文所研究的MHFSP-UPM&FB可描述为:共有 N 个工件进入连续的 G 个生产阶段,每个工件 i 依次经每个阶段 j 进行加工,每个阶段有 $m_j (m_j \geq 1)$ 台不相关并行机,至少有一个阶段 $m_j \geq 2$. 车间含不相关机说明了工件的加工时间依赖于机器和工件,这类问题更具有广义性. 各生产阶段之间存在有限的中间缓冲区,工件完成前一阶段的加工之后进入缓冲区以等待下道工序的开工. 将缓冲能力的上限设为 B_j , 当进入缓冲区的工件数超过 B_j 时,超出的工件只能停留在前一生产阶段的机器上,从而导致该阶段机器的阻塞而无法加工其他工件,直至下一阶段所分配的机器释放.

为建立模型,将每个缓冲区看成一个生产阶段(即缓冲阶段),将存储能力为 B_j 的缓冲区视为 B_j 台离散机,与一般离散机不同的是,工件在这些机器上的加工时间为零. 从而将所研究问题转化为阻塞MHFSP-UPM(blocking MHFSP-UPM, BMHFSP-UPM), 转化后的阶段数为 $2G - 1$. 需要注意的是,位于偶数阶段的机器是加工时间为零的同构并行机. 目标为最小化 makespan, 旨在提高机器利用率. 调度的目的是要解决两个问题: 1) 将工件分配到每个阶段的并行机上; 2) 确定每台机器上工件的加工序列.

1.2 模型假设

- 1) 所有机器在调度开始即可获取,不考虑机器故障和维护延迟等;
- 2) 所有工件是独立的,相互之间无优先级关系;
- 3) 一台机器同一时刻至多处理一个工件,而每个工件同一时刻至多在一台机器上加工;
- 4) 工件在生产阶段之间的运输时间忽略不计.

1.3 符号定义

- 1) 参 数.
 - i : 工件标号, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$;
 - j : 阶段标号, $j \in \{1, 2, \dots, W\}$;
 - k : 机器标号, $k \in \{1, 2, \dots, m_j\}$;
 - t : 时间标号, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$;
 - W : 转换后的总阶段数, $W = 2G - 1$;
 - m_j : 在阶段 j 可利用的机器数;

- P_{ijk} : 工件 i 在阶段 j 的机器 k 上的加工时间;
- R_i : 工件 i 到达初始生产阶段的释放时间;
- H_{jk} : 处于阶段 j 的机器 k ;
- UM_{ij} : 工件 i 在奇数阶段 j 分配的不相关机器号;
- IM_{ij} : 工件 i 在偶数阶段 j 分配的同构机器号.

2) 决策变量.

- C_{\max} : 完工进度, $C_{\max} = \max\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$;
- s_{ijk} : 工件 i 在阶段 j 的机器 k 上的开工时间;
- x_{ijk} : 0-1 变量, 若工件 i 在阶段 j 的机器 k 上进行加工, 则其值为1, 否则为0;
- y_{ijt} : 0-1 变量, 若时刻 t 工件 i 在阶段 j 进行加工或阻塞, 则其值为1, 否则为0.

1.4 模型构建

基于上述表述,建立整数规划(IP)模型为

$$\min C_{\max}. \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^{m_j} x_{ijk} = 1, \forall i, j; \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ijt} \leq m_j, \forall j, t; \tag{3}$$

$$\sum_{t=1}^T y_{ijt} = \sum_{k=1}^{m_{j+1}} s_{i,j+1,k} x_{i,j+1,k} - \sum_{k'=1}^{m_j} s_{ijk'} x_{ijk'}, \forall i, j (j < W); \tag{4}$$

$$\sum_{t=1}^T y_{ijt} = \sum_{k=1}^{m_j} P_{ijk} x_{ijk}, \forall i, j (j = W); \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^{m_j} s_{ijk} x_{ijk} \geq \sum_{k'=1}^{m_{j-1}} x_{i,j-1,k'} (s_{i,j-1,k'} + P_{i,j-1,k'}), \forall i, j (j > 1); \tag{6}$$

$$C_i = \sum_{k=1}^{m_W} x_{iWk} (s_{iWk} + P_{iWk}), \forall i; \tag{7}$$

$$C_{\max} \geq C_i, \forall i; \tag{8}$$

$$R_i \leq \sum_{k=1}^{m_1} x_{i1k} s_{i1k}, \forall i; \tag{9}$$

$$s_{ijk} \geq 0, \forall i, j, k; \tag{10}$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j, k; \tag{11}$$

$$y_{ijt} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j, t. \tag{12}$$

针对BMHFSP-UPM的IP模型包括最小化最大完工时间,即目标(1),可由约束(7)和(8)计算得出;约

束(2)确保每个工件在任一阶段只能在一台机器上加工;约束(3)说明在每个阶段任一时刻加工的工件数不能超过该阶段可利用的机器数;约束(4)体现了阻塞现象;约束(5)说明工件在最后一个阶段一旦完工即可离开,不存在阻塞现象;约束(6)确定了同一工件的相邻两道工序间的加工优先级关系;约束(9)表示只有工件到达第1阶段后才能进行第1道工序的加工;约束(10)~(12)定义了变量的取值范围.

2 BMHFSP-UPM系统的编码方案

由前述可知,转化后的BMHFSP-UPM中,工件的加工机器流有 W 个阶段,并行机类型既包括同构机(偶数阶段),也含有不相关并行机(奇数阶段).因此,调度模型不仅要解决工件排序问题,还要确定工件在并行机的分配,本节设计一种基于多阶段并行加工的二维矩阵编码方案.

2.1 多阶段不相关并行机器流生成机制

1) 基于不相关并行机的多阶段加工系统.

基于不相关并行机的多阶段加工系统中,每个工件需连续地经多个生产阶段进行加工,由于不相关并行机加工时间各不相同,在奇数阶段工件分配的机器不同,使得工件在该阶段的完工时间也会不同.利用自然数编码形式对每台并行机进行编号,如图1所示.

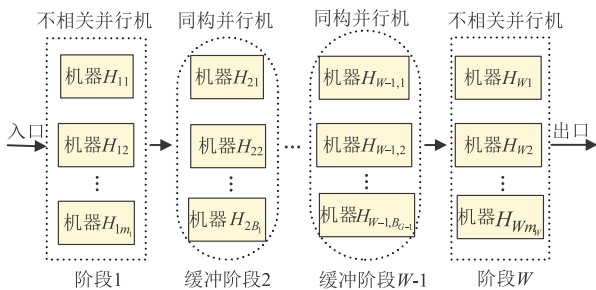


图1 带不相关并行机的多阶段加工系统

2) 基于不相关并行机的多阶段加工机器流.

因BMHFSP-UPM包含不相关并行机,工件在并行机的分配决定了其完工时间,故需考虑工件的加工机器流.当工件进入加工系统后,在每个阶段选择一台空闲机器进行加工,从而形成了一个横向的工件加工机器流,如图2所示.

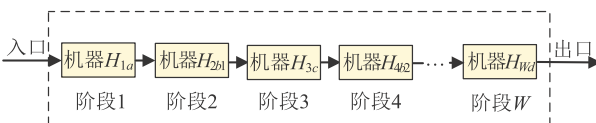


图2 基于不相关并行机的多阶段加工机器流

3) 基于机器释放原则的工件加工机器流.

当工序 Q_{ij} 在阶段 j 加工时,并行机器组中先释放出的机器 l 首先被分配,当它完成该阶段的加工后,

若阶段 $j+1$ 无可利用的机器,则工件 i 滞留在机器 l 上进行等待,其滞留时间段 BT_{ij} 取决于 $Q_{i,j+1}$ 在阶段 $j+1$ 的开工时间与 Q_{ij} 在机器 l 的完工时间.在该时间段内,该机器仍无法加工其他工件,直至下一阶段有机器释放出来.

2.2 多阶段并行机器流的编码和解码

采用基于不相关并行机机器号的工件加工机器流生成机制,对随机生成的工件序列中的每个工件在各阶段的机器分配进行编码,以此形成二维染色体矩阵,如图3所示.矩阵里的每个编码代表染色体的基因,染色体的长度为总阶段数, UM_{ij} 和 IM_{ij} 均服从 $[1, m_j]$ 的均匀分布(偶数阶段 $m_j = B_{j/2}$).

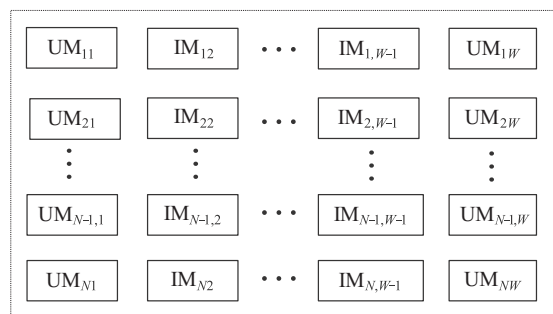


图3 基于批量工件的二维染色体编码

为获取问题的解,需执行解码过程.上述二维染色体矩阵的每个元素代表着相应工件在不同阶段的机器分配,因此,根据工件序列,依次将各工件分配在给定的机器上,如果下游机器无空闲,则工件保留在当前阶段的机器上直至下游所分配机器释放.表1说明了4个工件3个阶段的一个实例的解的表述,各阶段的机器数分别为2、1(缓冲阶段)和2.染色体矩阵的第1行表示工件1在阶段1选择机器2进行加工,在阶段2分配在机器1上,在阶段3安排在机器2上.由于工件1是第1个加工的工件,且阶段2的机器加工时间为0,工件1不经过缓冲阶段且无阻塞现象.之后,安排工件2时,当它完成阶段1的加工后,若在其完成时刻 H_{32} 正在加工工件1,则它需进入缓冲阶段等待,否则直接进入阶段3加工.接着考虑工件3,由于 H_{31} 一直空闲,它完成阶段1的加工后可直接进入 H_{31} 加工.最后,对于工件4,它在 H_{11} 完成加工后,若 H_{31} 在忙碌,则需进入缓冲阶段;若缓冲区已满,则停滞在 H_{11} ,直至阶段2的缓冲能力释放,方可进入等

表1 实例的染色体表述

	工件1		工件2		工件3		工件4	
阶段1	2	3	1	2	3	1	2	3
阶段2	1	2	1	1	2	2	1	1
阶段3	2	1	1	1	2	1	1	1

待,它在 H_{11} 的阻塞时间取决于 H_{21} 的释放时间. 根据工件的各时间参数,生成如图4的调度的甘特图.

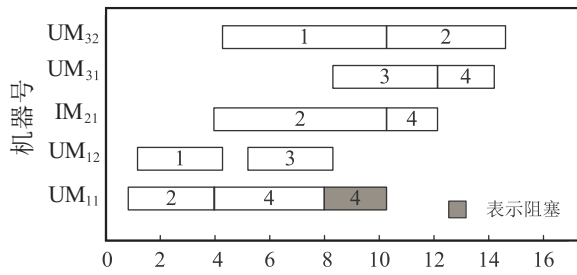


图4 4个工件在3个阶段加工的调度甘特图

3 混合启发式算法

GA是求解组合优化问题的一种常见方法,其进化算子主要有选择、交叉和变异,其实质是通过染色体的进化最终生成最优解的过程.但随着规模的扩大,容易陷入早熟.TS作为一种邻域搜索算法,常用于获得组合优化问题的全局最优解,但它需设置的参数较多,具有较弱的鲁棒性.因此,结合GA和TS,引入参数自适应策略,本文提出一种混合启发式算法(HH-GA&TS)求解BMHFSP-UPM.它从GA得到的解群体内筛选出较好个体,将它们按完工时间的增序生成列表,选择前40%的个体进行禁忌搜索,并在TS中再次产生邻域解以扩大解的搜索能力,避免短时间陷入局部最优,从而增强了GA的爬山能力.

3.1 基于二维矩阵元胞组的初始解群体表述

基于前述二维矩阵编码方案,利用自然整数编码方式对工件在机器的安排进行编码,为了防止出现少量机器空闲的现象,令其值服从 $[1, m_j]$ 的均匀分

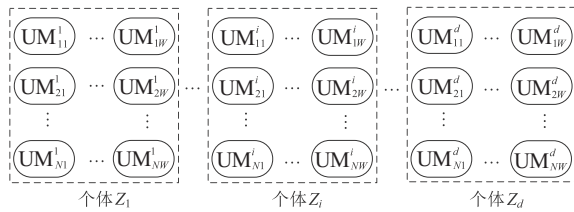


图5 初始种群二维矩阵元胞组

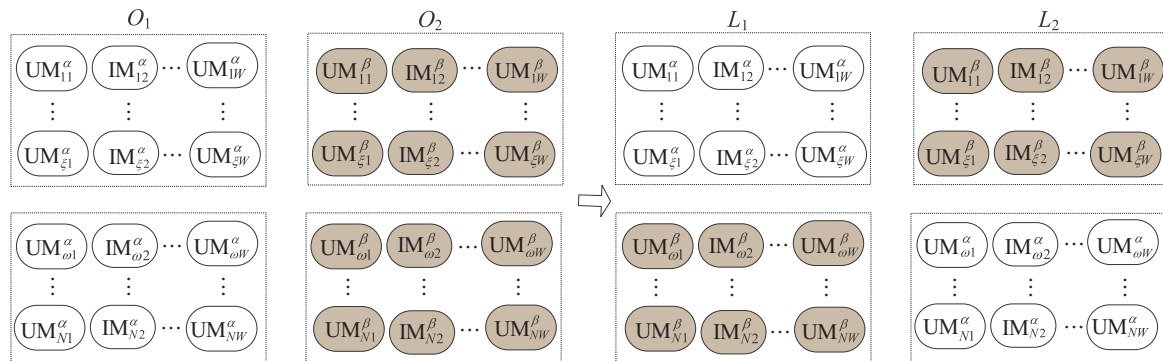


图6 基于工件位的单点交叉方式

布. 据此产生 d 个个体 $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_d\}$ 作为初始种群,组成二维矩阵元胞组(见图5).

3.2 嵌入参数自适应策略的GA解更新过程

1) 适应度计算和选择操作.

BMHFSP-UPM 模型的目标是最小化最大完工时间,因此,获取最大完工时间后通过下式计算个体 e 的适应度值:

$$F(e) = 1/C_{\max}. \quad (13)$$

选择操作采用轮盘赌规则,利用下式计算选择概率 PR_e :

$$PR_e = \frac{F(e)}{\sum_{e=1}^d F(e)}. \quad (14)$$

将其与随机数 r 进行比对,从而确定选择范围.

2) 参数自适应策略设计.

设计自适应调整策略,设置交叉概率 p_{cI} 和变异概率 p_{mI} ,基于文献[33],计算如下:

$$p_{cI} = \begin{cases} p_{c \max} - (p_{c \max} - p_{c \min}) \left(\frac{I}{MI} + \frac{F(e)}{F_{\max} - F_{\text{avg}}} \right), & F(e) \geq F_{\text{avg}}; \\ p_{c \max}, & F(e) < F_{\text{avg}}. \end{cases}$$

$$p_{mI} = \begin{cases} p_{m \max} - (p_{m \max} - p_{m \min}) \left(\frac{I}{MI} + \frac{F(e)}{F_{\max} - F_{\text{avg}}} \right), & F(e) \geq F_{\text{avg}}; \\ p_{m \max}, & F(e) < F_{\text{avg}}. \end{cases}$$

其中: $[p_{c \min}, p_{c \max}] = [0.5, 0.99]$, $[p_{m \min}, p_{m \max}] = [0.1, 0.5]$, I 为当前迭代数, MI 为最大迭代数.

由于 $p_{c \max}$ 、 $p_{c \min}$ 、 $p_{m \max}$ 、 $p_{m \min}$ 等参数的设置对算法影响很大,根据所研究问题的特点,利用经验估算测定它们的取值范围,进而在执行仿真实验时测试不同的取值组合,通过对比实验结果从中找到一组最佳设置.

3) 基于工件位-基因位的单点倒置交叉过程.

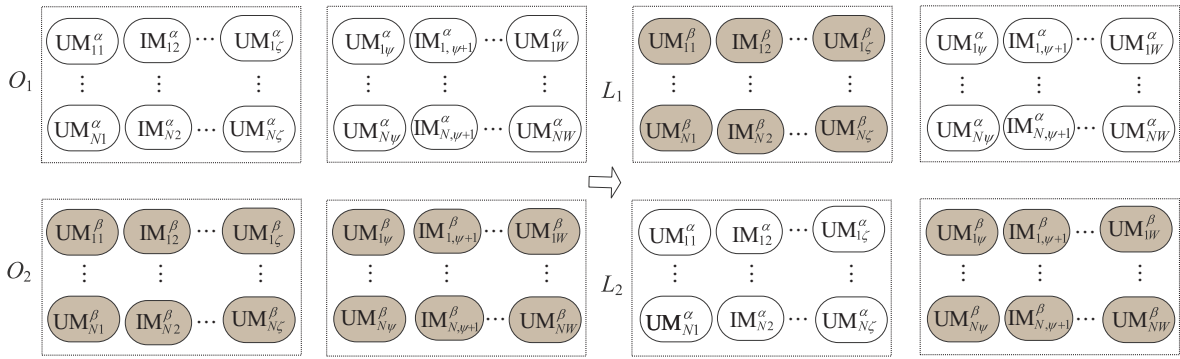


图7 基于基因位的单点变异方式

交叉操作采用单点倒置交叉方式,分别设计基于工件位和基于基因位的两种交叉方式. 首先,从元胞组中随机选择两个染色体 O_1 和 O_2 作为父代. 然后,随机选择一种交叉方式,若为基于工件位的交叉方式,则在 $[1, N]$ 中随机产生一个工件位 ξ ,将 O_1 中 ξ 之后的工件位与 O_2 中 ξ 之后的工件位进行交叉;否则,在 $[1, W]$ 中随机产生一个基因位 ζ ,将 O_1 中 ζ 之前的基因位与 O_2 中 ζ 之前的基因位进行交叉. 最后,依据前步的交叉操作形成子代染色体 L_1 和 L_2 ,如图6和图7所示.

4) 基于机器号的单点变异过程.

变异操作采用单点变异方式,从染色体矩阵中随机选择某个机器号,为它所对应的工序重新安排其他机器,如图8所示.

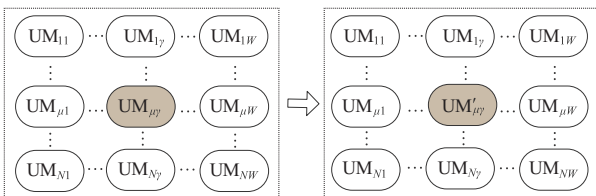


图8 基于机器号的单点变异方式

3.3 基于MNE-JNE-JNM的TS二次优化过程

为进一步改善解的质量,启用TS扩大搜索范围. 采用最优解搜索策略,将初始解作为最优解,根据规则产生邻域解,对初始解和邻域解进行评估,找出最好未被禁忌的解作为最优解,循环往复,直到满足终止条件. 基于前述二维矩阵编码的特点,本文提出以下3种邻域解的移动规则.

- 1) 基于机器号的交换 (MNE). 随机选择一个生产阶段的两个机器号,将其进行对调,如图9所示.
- 2) 基于工件的交换 (JNE). 随机选择两个工件 λ 和 θ ,交换它们对应的机器号,如图10所示.
- 3) 基于工件的变异 (JNM). 随机确定两个工件,对它们所对应的机器号重新分配,如图11所示.

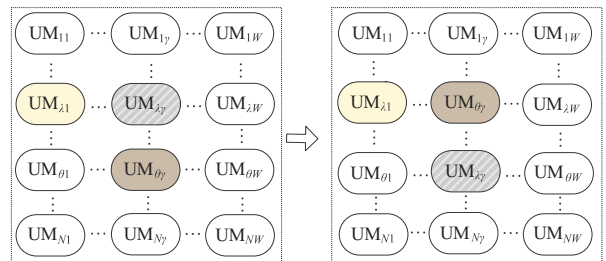


图9 基于MNE的邻域结构

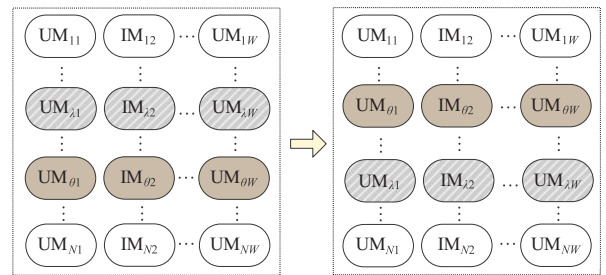


图10 基于JNE的邻域结构

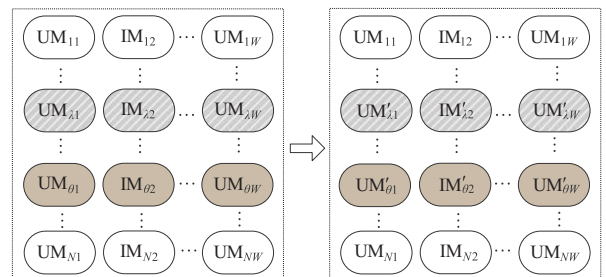


图11 基于JNM的邻域结构

将GA产生的较好个体按其完工时间的增序进行排列,对列表中前40%的个体 $\{Z^c\}$ 执行如下TS过程.

step 1: 初始化参数. 禁忌表 (tabulist)、禁忌长度 (tabulenth)、迭代步数 (iter=1)、最大迭代步数 (maxiter)、邻域解个数 (TB).

step 2: 从 $\{Z^c\}$ 中随机产生初始解 Z' ,将初始解作为最优解 ($BSF = Z'$),计算适应度值 F' ($bestC = F'$).

step 3: 随机选择上述邻域解的移动规则, 产生TB个新的邻域解集 $V\{Z\} = \{Z^1, Z^2, \dots, Z^{TB}\}$, 分别计算适应度值, 找到最大适应度值 F'' , 其对应的解为 Z'' .

step 4: 若 $F'' > \text{best}C$, 则令 $\text{best}C = F''$, $\text{BSF} = Z''$, 更新禁忌表, 转至step 6.

step 5: 从邻域解集 $V\{Z\}$ 中选择不在禁忌表内的最佳适应度值 F''' 所对应的解 Z''' 作为最优解 ($\text{BSF} = Z'''$, $\text{best}C = F'''$), 更新禁忌表.

step 6: $\text{iter} = \text{iter} + 1$, 若 $\text{iter} \leq \text{maxiter}$, 则返回step 2; 否则, 输出最优解BSF.

4 仿真实验

4.1 实验设计

为验证本文算法的有效性, 将本文所提出的HH-GA&TS进行仿真实验, 并与传统GA、TS以及文献[33]提出的结合NEH启发式算法的改进GA (NEH-IGA)进行比对. 所有测试均在Matlab R2014a及处理器为AMD A8-4500M, 1.9 GHz, 内存为4.00 G的计算机上编译进行.

为公平比较上述算法, 经实验测试, 将传统GA的交叉概率 p_c 设为0.6, 变异概率 p_m 设为0.3; GA、TS、NEH-IGA和HH-GA&TS的种群规模均设为90, 最大迭代数为100, 最大运行时间为1 200 s; 设置TS、NEH-IGA和HH-GA&TS的停止时间与GA执行100代的计算时间相同. 工件加工时间 P_{ijk} 和释放时间 R_i 满足[1,10]的均匀分布. 令 IR_1 表示HH-GA&TS对于GA的改进率, IR_2 表示HH-GA&TS对于TS的改进率, IR_3 表示HH-GA&TS对于NEH-IGA的改进率, 计算如下:

$$\text{IR}_1 = \frac{(C_{\text{GA}}^* - C_{\text{HH-GA\&TS}}^*)}{C_{\text{HH-GA\&TS}}^*} \times 100\%,$$

$$\text{IR}_2 = \frac{(C_{\text{TS}}^* - C_{\text{HH-GA\&TS}}^*)}{C_{\text{HH-GA\&TS}}^*} \times 100\%,$$

$$\text{IR}_3 = \frac{(C_{\text{NEH-IGA}}^* - C_{\text{HH-GA\&TS}}^*)}{C_{\text{HH-GA\&TS}}^*} \times 100\%.$$

4.2 最优调度的甘特图

以 $N = 10, W = 3, m_j = 3, B_1 = 1$ 的BMHFSP-UPM为例, 工件的释放时间以及在阶段1和阶段3的加工时间设置如表2. 因阶段2为有一台机器的缓冲阶段, 故 $P_{i2k} = 0$. 运行HH-GA&TS可得到最大完工时间为21, 最优调度甘特图如图12所示.

4.3 HH-GA&TS混合算法实验

为了分析TS和自适应调整策略的引入对GA的影响, 以相同的迭代数100作为停止条件, 分别运行

表2 时间参数设定

工件	阶段1的加工时间			阶段3的加工时间			R_i
	机器1	机器2	机器3	机器1	机器2	机器3	
1	6	6	1	4	9	3	8
2	10	6	9	10	5	3	4
3	8	7	9	10	2	2	6
4	2	7	8	9	4	7	3
5	3	4	6	7	6	4	4
6	9	10	8	5	6	3	3
7	1	7	2	5	7	9	5
8	5	5	1	1	10	7	6
9	4	4	8	6	1	6	9
10	8	7	1	9	7	1	5

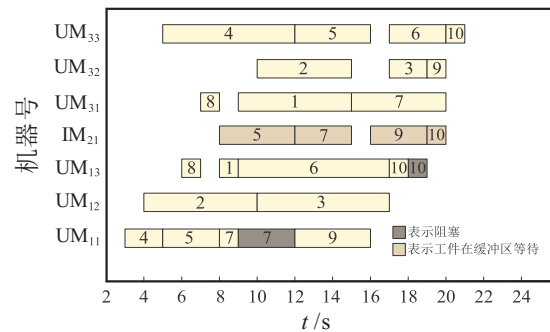


图12 最优调度甘特图

传统GA、NEH-IGA和HH-GA&TS求解 $N = \{10, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 120\}$ 各规模的一组实例 ($W = 3, m_j = 3, B_1 = 1$), 得到如图13所示的目标值变化趋势曲线. 由图13可以看出: HH-GA&TS较GA和NEH-IGA收敛较晚, 解的质量有较大改善; 虽然NEH-IGA在迭代初期有较好表现, 但过早收敛; HH-GA&TS在迭代后期收敛速度较快, 即在相同迭代数内, HH-GA&TS得到了更高质量的解. 因此, 在GA中引入TS和参数自适应调整策略明显提高了算法性能.

4.4 不同规模问题的实验测试

为了对所提出算法的性能进行全方位的评估, 设计不同规模问题的实验, 参数设置如下: $N = \{10, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 120\}$, $W = \{3, 5\}$ (含缓冲阶段), $m_j = \{2, 3, 4\}$, $B_j = \{1, 2\}$. 假设每个阶段的并行机数相同, 上述参数的不同组合共产生72种问题规模, 每种规模随机测试10组实例, 因此, 本实验共测试720组实例. 考虑到实际生产中时间的重要性, 也将最大运行时间1 200 s作为停止条件. 为公平起见, 将NEH-IGA的参数设置为与HH-GA&TS相同, 在GA的运行时间内分别执行TS、NEH-IGA和HH-GA&TS, 实验结果如表3和表4所示, 表中的每个值为同一规模的10组实例的平均值(除最后一行).

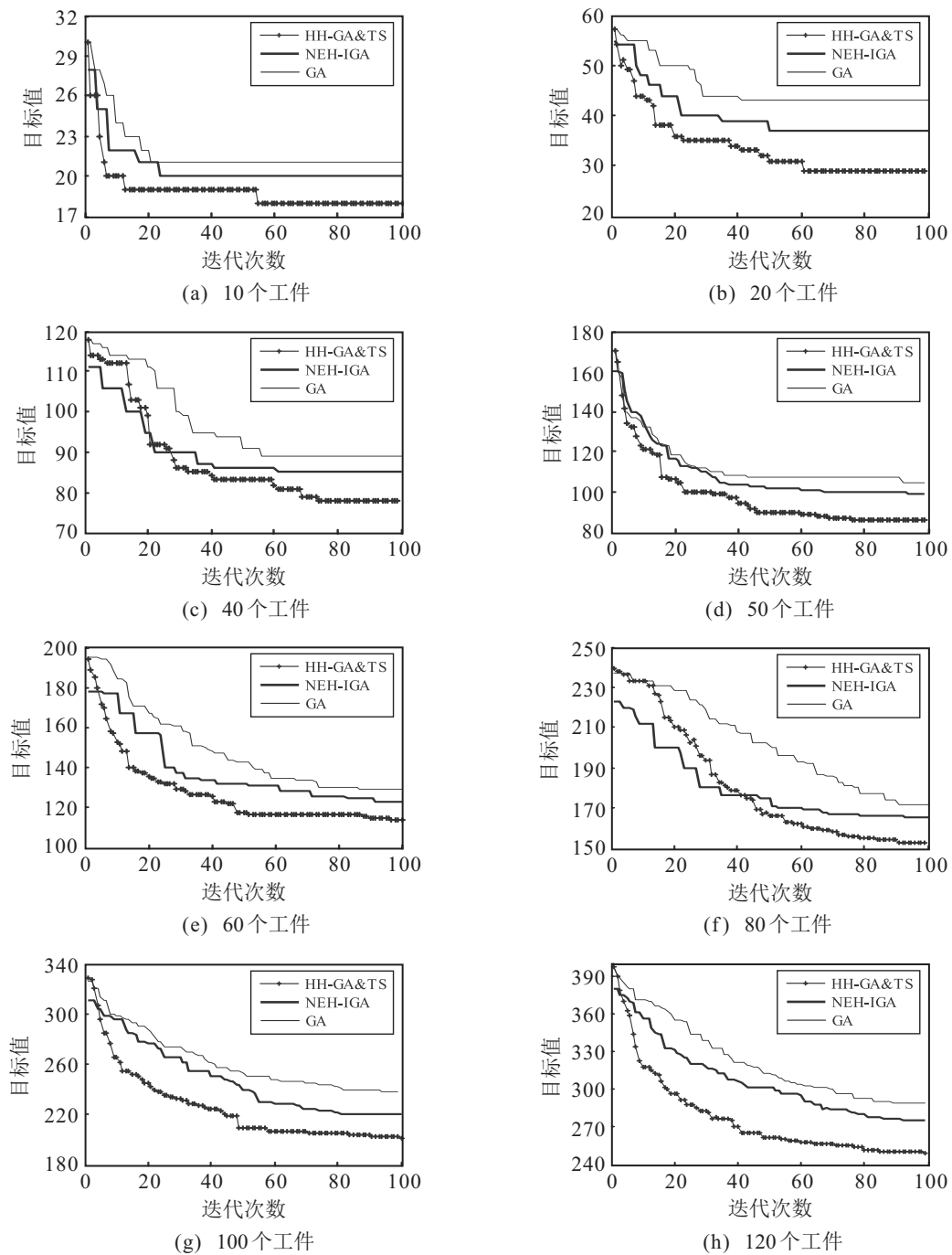


图 13 不同规模问题的目标值变化趋势

从表3和表4可知:

1) 对于中小规模问题,在平均运行时间509.25 s内,由GA、TS、NEH-IGA以及HH-GA&TS四种算法得到的平均目标值分别为75、84、71、66. HH-GA&TS的目标值相对于GA改进了13.1%,相对于TS改进了31.8%,相对于NEH-IGA改进了6.9%.

2) 对于大规模问题,在平均运行时间1190.69 s内,由4种算法得到的平均目标值分别为249、260、242、233. HH-GA&TS的目标值较GA改进了7.1%,较TS改进了13.4%,较NEH-IGA改进了4.6%.

3) 对于不同规模问题,在总平均运行时间

849.97 s内,HH-GA&TS求解质量最好,得到的平均目标值为150;TS算法求解质量最差,得到的平均目标值为172. HH-GA&TS相对于GA总体改进了10.1%,相对于TS总体改进了22.6%,相对于NEH-IGA改进了5.7%. 因此,就整体性能而言,HH-GA&TS的表现一致优于GA、TS和NEH-IGA.

4) 虽然在某些规模中HH-GA&TS相对于NEH-IGA并无改进,即其目标值略差于NEH-IGA,但这种差别很小,该情况仅占有实例的一小部分,随着问题规模的增大,该差异越来越小. 而且,这些实验结果是在相同运行时间的前提下得到的,如果以相同的迭

代数(100次迭代)为停止条件,则由HH-GA&TS得到的目标值实际是优于NEH-IGA的,这一结论也可从图13中得到.

5 结 论

本文研究了一类带不相关并行机且缓冲区有限的多阶段HFSP,将该问题转化为BMHFSP-UPM后,以最小化最大完工时间为目标建立了整数规划模型,

基于多阶段并行加工的BMHFSP-UPM系统二维矩阵编码方案,结合改进GA和TS提出了HH-GA&TS启发式算法以得到近优解.为提高GA的寻优能力,引入随迭代进程而变化的遗传参数自适应调整策略,并设计了基于工件位-基因位的单点倒置交叉和基于机器号的单点变异;针对GA新解,设计了MNE、JNE和JNM三种邻域解移动规则,利用基于MNE-JNE-JNM

表 3 中小规模问题的测试结果

$N \times m_j \times W \times B_j$	min C_{max}				IR ₁ /%	IR ₂ /%	IR ₃ /%	CPU/s
	GA	TS	NEH-IGA	HH-GA&TS				
10 × 2 × 3 × 1	31	35	31	29	6.9	20.7	6.9	70.00
10 × 3 × 3 × 1	27	32	26	25	8.0	28.0	4.0	58.42
10 × 3 × 3 × 2	26	33	24	23	13.0	43.5	4.3	44.68
10 × 4 × 3 × 1	21	27	21	20	5.0	35.0	5.0	51.36
10 × 4 × 3 × 2	22	26	22	21	4.8	23.8	4.8	34.54
10 × 3 × 5 × 1	31	39	29	27	14.8	44.4	7.4	108.31
10 × 3 × 5 × 2	30	38	29	27	11.1	40.7	7.4	112.31
10 × 4 × 5 × 1	28	33	26	24	16.7	37.5	8.3	90.96
10 × 4 × 5 × 2	29	35	27	26	11.5	34.6	3.8	88.05
20 × 2 × 3 × 1	65	70	59	56	16.1	25.0	5.4	169.29
20 × 3 × 3 × 1	43	48	41	36	19.4	33.3	13.9	191.93
20 × 3 × 3 × 2	43	54	42	38	13.2	42.1	10.5	172.83
20 × 4 × 3 × 1	38	53	35	32	18.8	65.6	9.4	172.30
20 × 4 × 3 × 2	37	45	34	30	23.3	50.0	13.3	171.93
20 × 3 × 5 × 1	52	65	49	45	15.6	44.4	8.9	378.19
20 × 3 × 5 × 2	54	64	47	48	12.5	33.3	-2.1	361.70
20 × 4 × 5 × 1	48	61	45	43	11.6	41.9	4.7	348.44
20 × 4 × 5 × 2	45	54	42	40	12.5	35.0	5.0	336.70
40 × 2 × 3 × 1	103	106	102	96	7.3	10.4	6.3	668.25
40 × 3 × 3 × 1	90	99	92	81	11.1	22.2	13.6	601.04
40 × 3 × 3 × 2	86	103	78	74	16.2	39.2	5.4	602.93
40 × 4 × 3 × 1	70	73	68	64	9.4	14.1	6.3	595.54
40 × 4 × 3 × 2	65	91	64	57	14.0	59.6	12.3	475.52
40 × 3 × 5 × 1	119	136	107	102	16.7	33.3	4.9	882.12
40 × 3 × 5 × 2	104	132	92	92	13.0	43.5	0.0	988.30
40 × 4 × 5 × 1	86	105	84	77	11.7	36.4	9.1	978.61
40 × 4 × 5 × 2	83	100	82	73	13.7	37.0	12.3	910.50
50 × 2 × 3 × 1	177	177	162	161	9.9	9.9	0.6	869.35
50 × 3 × 3 × 1	124	135	112	99	25.3	36.4	13.1	724.16
50 × 3 × 3 × 2	118	128	99	98	20.4	30.6	1.0	701.32
50 × 4 × 3 × 1	88	100	86	83	6.0	14.1	6.3	815.23
50 × 4 × 3 × 2	95	105	88	81	17.3	20.5	3.6	898.12
50 × 3 × 5 × 1	163	166	157	153	6.5	8.5	2.6	1200.00
50 × 3 × 5 × 2	158	156	155	141	12.1	10.6	9.9	1200.00
50 × 4 × 5 × 1	154	156	148	140	10.0	11.4	5.7	1170.10
50 × 4 × 5 × 2	140	138	136	122	14.8	13.1	11.5	1090.00
平均	75	84	71	66	13.1	31.8	6.9	509.25

表4 大规模问题的测试结果

$N \times m_j \times W \times B_j$	$\min C_{\max}$				IR ₁ /%	IR ₂ /%	IR ₃ /%	CPU/s
	GA	TS	NEH-IGA	HH-GA&TS				
60 × 2 × 3 × 1	186	226	178	173	7.5	30.6	2.9	1 200.00
60 × 3 × 3 × 1	134	170	125	123	8.9	38.2	1.6	1 150.00
60 × 3 × 3 × 2	132	150	130	119	10.9	26.1	9.2	1 015.00
60 × 4 × 3 × 1	156	147	105	145	17.9	38.9	10.5	1 200.00
60 × 4 × 3 × 2	88	89	88	79	11.4	12.7	11.4	1 200.00
60 × 3 × 5 × 1	176	202	172	164	7.3	23.2	4.9	1 200.00
60 × 3 × 5 × 2	161	169	151	151	6.6	11.9	0.0	1 200.00
60 × 4 × 5 × 1	148	148	145	138	7.2	7.2	5.1	1 200.00
60 × 4 × 5 × 2	137	142	135	130	5.4	9.2	3.8	1 200.00
80 × 2 × 3 × 1	293	298	279	278	5.4	7.2	0.4	1 200.00
80 × 3 × 3 × 1	192	208	187	181	6.1	14.9	3.3	1 200.00
80 × 3 × 3 × 2	167	177	167	158	5.7	12.0	5.7	1 200.00
80 × 4 × 3 × 1	156	147	156	145	7.6	1.4	7.6	1 200.00
80 × 4 × 3 × 2	145	152	143	137	5.8	10.9	4.4	1 200.00
80 × 3 × 5 × 1	247	261	241	234	5.6	11.5	3.0	1 200.00
80 × 3 × 5 × 2	232	253	231	218	6.4	16.1	6.0	1 200.00
80 × 4 × 5 × 1	209	227	207	197	6.1	15.2	5.1	1 200.00
80 × 4 × 5 × 2	192	214	191	181	6.1	18.2	5.5	1 200.00
100 × 2 × 3 × 1	367	396	363	349	5.2	13.5	4.0	1 200.00
100 × 3 × 3 × 1	278	315	275	262	6.1	20.2	5.0	1 200.00
100 × 3 × 3 × 2	239	281	239	229	4.4	22.7	4.4	1 200.00
100 × 4 × 3 × 1	216	200	209	197	9.6	1.5	6.1	1 200.00
100 × 4 × 3 × 2	202	220	193	187	8.0	17.6	3.2	1 200.00
100 × 3 × 5 × 1	336	358	335	326	3.1	9.8	2.8	1 200.00
100 × 3 × 5 × 2	317	330	305	307	3.3	7.5	-0.7	1 200.00
100 × 4 × 5 × 1	284	295	283	269	5.6	9.7	5.2	1 200.00
100 × 4 × 5 × 2	263	273	254	249	5.6	9.6	2.0	1 200.00
120 × 2 × 3 × 1	466	466	461	425	9.6	9.6	8.5	1 200.00
120 × 3 × 3 × 1	374	382	367	358	4.5	6.7	2.5	1 200.00
120 × 3 × 3 × 2	335	337	329	302	10.9	11.6	8.9	1 200.00
120 × 4 × 3 × 1	288	286	288	277	4.0	3.2	4.0	1 200.00
120 × 4 × 3 × 2	296	282	271	264	12.1	6.8	2.7	1 200.00
120 × 3 × 5 × 1	421	402	396	388	5.7	3.6	2.1	1 200.00
120 × 3 × 5 × 2	410	156	155	141	12.1	10.6	9.9	1 200.00
120 × 4 × 5 × 1	400	407	390	369	8.4	10.3	5.7	1 200.00
120 × 4 × 5 × 2	333	331	330	312	6.7	6.1	5.8	1 200.00
平均	249	260	242	233	7.1	13.4	4.6	1 190.69

的TS进一步搜索更好解. 对不同规模问题的数值测试表明了HH-GA&TS在解的质量和收敛速度方面均优于GA、TS及NEH-IGA,能较好地解决贴近实际生产的MHFSP-UPM&FB.

未来研究可围绕以下几方面开展:1) 所研究问题假定生产阶段间缓冲能力有限,而零等待方式要求工件连续进行加工,可视为有限缓冲的一种特殊情况,

即缓冲能力为零,因此,可推广本文模型使其能解决零等待MHFSP-UPM;2) 本文提出的混合启发式算法采用随机程序生成初始种群,然而该方式在前期迭代表现略差,故还可以继续优化该算法,尝试引入启发式算法以改善初始种群,再次提高算法性能;3) 本文解决的是单目标makespan问题,可将所提出算法推广至求解其他单目标或多目标问题,如总完工时间

等;4) 未来研究还可探讨其他超启发式算法(如变邻域搜索、蚁群优化)求解MHFSP-UPM&FB的能力。

参考文献(References)

- [1] Salvador M S. A solution to a special class of flow shop scheduling problems[J]. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 1973, 86: 83-91.
- [2] Li J Q, Pan Q K. Solving the large-scale hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers by a hybrid artificial bee colony algorithm[J]. *Information Sciences*, 2015, 316: 487-502.
- [3] Gupta J N D. Two-stage hybrid flowshop scheduling problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1988, 39(4): 359-364.
- [4] Mousavi S M, Zandieh M. An efficient hybrid algorithm for a bi-objectives hybrid flow shop scheduling[J]. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2018, 24(1): 9-16.
- [5] Dios M, Fernandez-Viagas V, Framinan J M. Efficient heuristics for the hybrid flow shop scheduling problem with missing operations[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 115: 88-99.
- [6] Moccellini J V, Nagano M S, Pitombeira Neto A R, et al. Heuristic algorithms for scheduling hybrid flow shops with machine blocking and setup times[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(2): 40.
- [7] Cho H M, Bae S J, Kim J, et al. Bi-objective scheduling for reentrant hybrid flow shop using Pareto genetic algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 61(3): 529-541.
- [8] Hekmatfar M, Fatemi Ghomi S M T, Karimi B. Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 4530-4539.
- [9] Pan Q K, Ruiz R, Alfaro-Fernández P. Iterated search methods for earliness and tardiness minimization in hybrid flowshops with due windows[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 80: 50-60.
- [10] 韩忠华, 朱一行, 史海波, 等. 基于改进紧致遗传算法的柔性流水线组批排产优化问题研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(6): 1616-1624.
(Han Z H, Zhu Y H, Shi H B, et al. Study for the flexible flow shop scheduling problem with batch process machines based on an advanced compact genetic algorithm[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(6): 1616-1624.)
- [11] Figielska E. Scheduling in a two-stage flowshop with parallel unrelated machines at each stage and shared resources[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 126: 435-450.
- [12] Rabiee M, Sadeghi Rad R, 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[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(5): 1229-1245.
- [13] Li Z T, Liu J J, Chen Q X, et al. Approximation algorithms for the three-stage flexible flow shop problem with mid group constraint[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(7): 3571-3584.
- [14] Meng L L, Zhang C Y, Shao X Y, et al. Mathematical modelling and optimisation of energy-conscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(4): 1119-1145.
- [15] Yu C L, Semeraro Q, Matta A. A genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with unrelated machines and machine eligibility[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 100: 211-229.
- [16] Asadi-Gangraj E. Lagrangian relaxation approach to minimize makespan for hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines[J]. *Scientia Iranica*, 2017, 25(6): 3765-3775.
- [17] Sun Z W, Gu X S. A novel hybrid estimation of distribution algorithm for solving hybrid flowshop scheduling problem with unrelated parallel machine[J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(8): 1779-1788.
- [18] 宋存利. 求解混合流水线车间调度的改进贪婪遗传算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(5): 1079-1086.
(Song C L. Improved greedy genetic algorithm for solving the hybrid flow-shop scheduling problem[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(5): 1079-1086.)
- [19] Li D N, Meng X W, Liang Q Q, et al. A heuristic-search genetic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with single processing machines and batch processing machines[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(5): 873-890.
- [20] Zabihzadeh S S, Rezaeian J. Two meta-heuristic algorithms for flexible flow shop scheduling problem with robotic transportation and release time[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 40: 319-330.
- [21] Kim H-W, Lee D-H. Heuristic algorithms for re-entrant hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, 2009, 223(4): 433-442.

- [22] Yaurima-Basaldua V H, Tchernykh A, Villalobos-Rodríguez F, et al. Hybrid flow shop with unrelated machines, setup time, and work in progress buffers for bi-objective optimization of tortilla manufacturing[J]. *Algorithms*, 2018, 11(5): 68.
- [23] Li J Q, Bai S C, Duan P Y, et al. An improved artificial bee colony algorithm for addressing distributed flow shop with distance coefficient in a prefabricated system[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(22): 6922-6942.
- [24] 韩玉艳, 李俊青, 桑红燕, 等. 离散NSGA-II求解带有限缓冲区的多目标批量流水线调度问题[J]. *聊城大学学报: 自然科学版*, 2018, 31(1): 89-96.
(Han Y Y, Li J Q, Sang H Y, et al. Discrete NSGA-II for multi-objective lot-streaming flow shop scheduling problem with limited buffers[J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science Edition*, 2018, 31(1): 89-96.)
- [25] Han Y Y, Li J Q, Gong D W, et al. Multi-objective migrating birds optimization algorithm for stochastic lot-streaming flow shop scheduling with blocking[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 5946-5962.
- [26] Wang Y M, Li X P, Ruiz R, et al. An iterated greedy heuristic for mixed no-wait flowshop problems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(5): 1553-1566.
- [27] Almeder C, Hartl R F. A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 145(1): 88-95.
- [28] 于艳辉, 李铁克. 一类缓冲区有限的两阶段混合流水车间调度问题及算法[J]. *工业工程*, 2013, 16(4): 105-110.
(Yu Y H, Li T K. Heuristic scheduling method for a class of two-stage hybrid flow shop with limited buffer[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2013, 16(4): 105-110.)
- [29] 韩忠华, 孙越, 史海波. 基于改进ICA算法的LBFFSP问题研究[J]. *信息与控制*, 2017, 46(4): 474-482.
(Han Z H, Sun Y, Shi H B. Research on flexible flow shop scheduling problem with limited buffer based on an improved ICA algorithm[J]. *Information and Control*, 2017, 46(4): 474-482.)
- [30] 王炳刚, 饶运清, 邵新宇, 等. 带有限中间缓冲区的多级并行机问题的求解[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(5): 86-89.
(Wang B G, Rao Y Q, Shao X Y, et al. Solving multi-stage parallel machine problem with limited intermediate buffers[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(5): 86-89.)
- [31] Soltani S A, Karimi B. Cyclic hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers and machine eligibility constraints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9/10/11/12): 1739-1755.
- [32] Hakimzadeh Abyaneh S, Zandieh M. Bi-objective hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times and limited buffers[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(1/2/3/4): 309-325.
- [33] 轩华, 李冰, 罗书敏, 等. 基于总加权完成时间的可重入混合流水车间调度问题[J]. *控制与决策*, 2018, 33(12): 2218-2226.
(Xuan H, Li B, Luo S M, et al. Reentrant hybrid flowshop scheduling problem based on total weighted completion time[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(12): 2218-2226.)

作者简介

轩华(1979—), 女, 教授, 博士, 从事物流优化与控制等研究, E-mail: hxuan@zzu.edu.cn;

郑倩倩(1993—), 女, 硕士生, 从事生产调度的研究, E-mail: 1683355494@qq.com;

李冰(1976—), 男, 教授, 博士, 从事物流优化与控制等研究, E-mail: lbing@zzu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)