



一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度模型与算法

袁帅鹏, 李铁克, 王柏琳, 余娜娜

引用本文:

袁帅鹏, 李铁克, 王柏琳, 等. 一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度模型与算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(7): 1773–1779.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1533>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑模糊作业时间的再制造加工车间多目标调度方法

Multi-objective optimization method of remanufacturing reprocessing shop scheduling with fuzzy processing time
控制与决策. 2020, 35(6): 1497–1504 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1187>

工件可拒绝的有限等待置换流水车间调度算法

Scheduling algorithm for permutation flowshop with limited waiting times and rejection
控制与决策. 2019, 34(3): 459–469 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1127>

基于总加权完成时间的可重入混合流水车间调度问题

Reentrant hybrid flowshop scheduling problem based on total weighted completion time
控制与决策. 2018, 33(12): 2218–2226 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0907>

传摘时间约束下的运输与批处理机生产协调调度

Coordinated scheduling of transportation and production on batching-machine with tracking time constraint
控制与决策. 2017, 32(6): 995–1000 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0489>

期望-风险准则多阶段流水车间鲁棒调度

Robust scheduling of multi-stage flow shop under machine breakdowns following expect-risk rule
控制与决策. 2016, 31(6): 1087–1092 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0568>

一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间 成组调度模型与算法

袁帅鹏[†], 李铁克, 王柏琳, 余娜娜

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083; 2. 钢铁生产
制造执行系统技术教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 从钢铁企业的管加工生产中抽象出一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度问题. 与传统阻塞约束不同, 工件是否发生阻塞并非取决于缓冲区容量, 而是取决于工件自身的规格、尺寸等属性. 针对此调度问题, 以最小化最大完工时间 (makespan) 为目标建立混合整数线性规划模型, 并通过三划分问题的多项式归结证明问题的强 NP 难特性, 进而将问题划分为工件组排序和工件组内工件排序两个子问题, 提出一种基于协同进化的分布估计算法. 算法针对两个子问题各自特点进行独立编码, 分别设计启发式规则构造初始种群, 并提出带有工件区块结构特征的概率模型来指导种群进化. 基于实际生产数据设计多种问题规模的实验, 从而表明所提出模型和算法的有效性.

关键词: 流水车间; 成组调度; 阻塞约束; 协同进化; 分布估计算法

中图分类号: TH165

文献标志码: A

Model and algorithm for two-stage flow shop group scheduling problem with special blocking constraint

YUAN Shuai-peng[†], LI Tie-ke, WANG Bai-lin, YU Na-na

(Donlinks School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production, Beijing 100083, China)

Abstract: A two-stage flow shop group scheduling problem with special blocking constraint is investigated based on the production reality of pipe-processing workshops in steel industry. In contrast to traditionally used blocking constraints, we use the attributes of the jobs, not the quantity of jobs in the current buffer area, to determine the need for a blocking feature. Firstly, the mixed integer linear programming model that minimizes the makespan is established, and it is proved that the problem is strongly NP-hard by reduction of the 3-partition problem. The co-evolutionary estimation of distributed algorithm (CEDA) is proposed according to the problem characteristics, in which the group sequence and the job sequence within each group are encoded independently. Heuristic rules based on the features of the sub-problems are provided to construct the initial population. Moreover, a block-based probabilistic model is designed to guide the population evolution. A variety of scale experiments based on the actual production data are carried out, and the result shows the effectiveness of proposed model and algorithm.

Keywords: flow-shop; group scheduling; blocking constraint; co-evolutionary; EDA

0 引言

本文研究一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度问题, 该问题源于钢铁企业无缝钢管产品在管加工车间生产管理的实际需求. 管加工车间包含切割和管体处理两个核心环节. 整个加工环境在生产组织上具有以下特点: 切割过程中管体的数量发生了变化, 切割前的长管体与切割后的短管体存

在 1 对多的关系; 在管体切割与管体处理间设有在制品库存区域, 但是受物理空间的限制, 长度过大的管体将无法进入中间缓冲区, 只能进行阻塞式加工.

若将切割后的子管体视为工件, 将切割前的父管体视为子管体成组加工的批, 则管加工生产环境可以抽象为一类具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度问题. 其中: 1) 成组调度源于切割前后管体间

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2019-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71701016, 71231001); 北京市自然科学基金项目 (9174038); 教育部人文社会科学青年基金项目 (17YJC630143); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (FRF-BD-18-009A).

责任编委: 刘士新.

[†]通讯作者. E-mail: shuaipengyuan@163.com.

一对多的关系,具有以下特征:所有工件被划分为若干工件组,每个工件只能属于一个工件组,且同工件组内的工件必须进行连续非中断式加工. 2) 特殊阻塞约束源于部分长度过大的管体,具有以下特征:工件按其属性被划分为有、无阻塞约束两类. 对于无阻塞约束的工件,在制品库存区域不存在容量限制;而对于有阻塞约束的工件,则无法进入在制品库存区域,只能在第1阶段上进行阻塞式加工. 事实上,此类与工件自身属性相关的阻塞约束还广泛存在于其他钢铁产品的制造过程中,比如:用于铁道铺设的轨梁轧制车间、棒线材轧制车间等. 因此,本文问题的研究对于连续性极强且存在定制产品需求的钢铁生产具有一定的实际应用价值.

对于成组调度问题,文献[1]研究一类两阶段流水车间成组调度问题,并以最小化 makespan 为目标提出了一种多项式最优算法;文献[2]研究一类带有序列不相关安装时间的两阶段流水车间成组调度问题,提出了一种两阶段混合启发式算法,但仅考虑了工件组间的排序问题;文献[3]在考虑序列相关安装时间的情况下,以最小化 makespan 为目标提出了改进的禁忌搜索算法,并给出3种问题的下界以验证所提出算法的有效性;针对同样的问题,文献[4]提出了一种两阶段贪婪迭代搜索算法;文献[5]首先给出两种混合整数线性规划模型,然后基于模型提出了一种混合遗传和模拟退火算法. 对于同时考虑阻塞约束的成组调度问题,文献[6]以两阶段流水车间为研究对象,给出一种求解工件组间排序的启发式算法,并对算法的上界进行了分析;文献[7]研究一类具有序列相关安装时间和有限缓冲约束的流水车间成组调度问题,以最小化 makespan 为目标提出了两种改进的禁忌搜索算法.

通过对上述文献的分析可以发现,目前,关于成组调度的研究成果主要针对安装时间约束,虽有少量文献同时考虑了阻塞约束,但均采用工件个数对缓冲区容量进行度量. 而现实工业生产环境下缓冲区的容量并非仅由工件数量决定,往往需要考虑工件自身的物化性能,如钢铁生产环境下的长度、外径等,目前尚未发现对此种阻塞约束进行研究的相关文献. 其次,成组调度问题可视为工件组排序和工件组内工件排序的联合决策,现有文献大多将两个子问题分别处理,而对两个子问题协同优化的研究则较少. 因此,本文调度问题具有一定的理论研究意义,且基于协同优化的思想设计算法能够为成组调度问题提供有效的求解思路.

本文首先对具有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度问题进行描述,并以最小化 makespan 为目标建立混合整数线性规划模型;然后证明问题的强NP难特性,进而提出一种基于协同进化的分布估计算法;最后对算法的有效性进行验证.

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

具有特殊阻塞约束的两阶段流水成组调度问题可描述如下:工件被划分为若干工件组并在两阶段流水车间环境下加工,同工件组内的工件必须进行连续非中断式加工. 工件按其属性被划分为有、无阻塞约束两类. 对于有阻塞约束的工件,只能在第1阶段上进行阻塞式加工. 该问题需要确定工件组间的加工顺序以及各工件组内工件间的加工顺序,使得所有工件组的最大完工时间(makespan)最小. 若使用gs表示成组调度,blcok*表示特殊阻塞约束,则根据三元组表示法,本文问题可表示为 $F_2|gs, block^*|C_{max}$.

1.2 符号定义

1) 问题参数.

$J_i \in \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$, J_i 为工件组编号, n 为工件组的数量; $J_{il} \in \{J_{i1}, J_{i2}, \dots, J_{in_i}\}$, J_{il} 为工件组 J_i 内工件的编号, n_i 为工件组 J_i 内工件的数量; p_{ilk} 为工件 J_{il} 在阶段 k 上的加工时间; Y_{il} 为0-1整型参数,用来表示工件 J_{il} 是否具有阻塞约束:若具有阻塞约束,则记 $Y_{il} = 1$, 否则为0.

2) 决策变量与优化目标.

$X_{i'i}$ 为0-1决策变量:若 $J_{i'}$ 先于且紧邻 J_i 被加工,则为1, 否则为0;若 J_i 作为首个工件组被加工,则表示为 $X_{0i} = 1$. $x_{il'l}$ 为0-1决策变量:若 J_i 内的工件 $J_{il'}$ 先于且紧邻 J_{il} 被加工,则为1, 否则为0;若 J_{il} 作为 J_i 内的首个工件被加工,则表示为 $x_{i0l} = 1$. s_{ilk} 、 c_{ilk} 分别为 J_{il} 在阶段 k 上的开工和完工时间; C_{ik} 为工件组 J_i 在阶段 k 上的完工时间; C_{max} 为最大完工时间.

1.3 问题模型

$$\min C_{max}. \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i'=0, i' \neq i}^n X_{i'i} = 1, \quad \forall i; \quad (2)$$

$$\sum_{i'=0, i' \neq i}^n X_{ii'} = 1, \quad \forall i; \quad (3)$$

$$\sum_{l'=0, l' \neq l}^{n_i} x_{il'l} = 1, \quad \forall i, l; \quad (4)$$

$$\sum_{l'=0, l' \neq l}^{n_i} x_{ill'} = 1, \quad \forall i, l; \quad (5)$$

$$s_{ilk} \geq C_{i'k} - M(2 - X_{i'i} - x_{i0l}), \forall i', i, l, k; \quad (6)$$

$$s_{ilk} \geq c_{il'k} - M(1 - x_{il'l}), \forall i, l', l, k; \quad (7)$$

$$s_{il2} - c_{il1} \geq 0, \forall i, l; \quad (8)$$

$$c_{il1} = s_{il1} + p_{il1}, \forall i, l, Y_{il} = 0; \quad (9)$$

$$c_{il1} \geq s_{il1} + p_{il1}, \forall i, l, Y_{il} = 1; \quad (10)$$

$$c_{il1} = s_{il2}, \forall i, l, Y_{il} = 1; \quad (11)$$

$$c_{il2} = s_{il2} + p_{il2}, \forall i, l; \quad (12)$$

$$C_{ik} \geq c_{ilk}, \forall i, l, k; \quad (13)$$

$$C_{\max} \geq C_{i2}, \forall i; \quad (14)$$

$$X_{i'i}, X_{0i}, x_{il'l}, x_{i0l} = 0 \text{ or } 1, \forall i, i', l, l'. \quad (15)$$

目标函数(1)表示最小化制造期;约束(2)和(3)分别表示各工件组均有且仅有一个紧前和紧后工件组,且两者不能相同;约束(4)和(5)表示同工件组内的各工件同样有且仅有一个紧前和紧后工件,且两者不能相同;约束(6)和(7)表示某阶段的处理机在同一时刻只能加工一个工件;约束(8)表示某一工件只有在完成当前工序后才可开始下一道工序的加工;约束(9)~(11)分别限制了有、无阻塞约束两类工件在阶段1上的完工时间;约束(12)表示工件在阶段2上的完工时间;约束(13)表示工件组在两阶段上的完工时间;约束(14)定义了制造期为所有工件的最大完工时间;约束(15)为整数变量的取值范围。

2 问题复杂性分析

对于问题 $F_2|gs, \text{block}^*|C_{\max}$, 由于特殊阻塞约束的存在,使得问题的性质发生了变化,且目前尚未发现对此问题研究的相关文献,因此,本节将对问题的复杂性进行分析。下面的定理1给出了该问题具有强NP难特性的证明。

定理1 问题 $F_2|gs, \text{block}^*|C_{\max}$ 具有强NP难特性。

证明 通过三划分问题进行归结。三划分问题描述如下:给定一个包含 $3t$ 个整数的集合 $T = \{a_1, \dots, a_{3t}\}$ 和正整数 b , 满足 $b/4 < a_j < b/2$ 以及 $\sum_{a_j \in T} a_j = tb$ 。问是否存在 t 个不相交的子集 $T_i (i = 1, 2, \dots, t)$, 使得 $\sum_{a_j \in T_i} a_j = b$?

构造问题 $F_2|gs, \text{block}^*|C_{\max}$ 的实例如下:

$$n = t, n_i = 5, i = 1, 2, \dots, t;$$

$$p_{i11} = p_{i21} = p_{i31} = p_{i41} = b/4, p_{i51} = b;$$

$$p_{i21} = 3b/4, p_{i22} = a_{3i-2}, p_{i32} = a_{3i-1},$$

$$p_{i42} = a_{3i}, p_{i52} = b/4;$$

$$Y_{i1} = Y_{i2} = Y_{i3} = Y_{i4} = 0, Y_{i5} = 1;$$

阈值 $z = 2tb + b/4$ 。

充分性: 假设三划分问题有解(不失一般性, 令 $T_i = \{a_{3i-2}, a_{3i-1}, a_{3i}\}$), 本文构造如图1所示的调度方案, 显然方案可行, 此时所有工件组的制造期为 $2tb + b/4$ 。

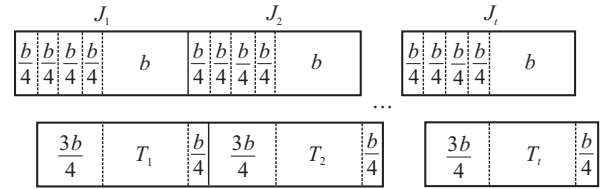


图1 调度方案

必要性: 易知所有工件组的制造期不小于 $\sum_{i=1}^t \sum_{l=1}^{n_i} p_{il1} + \min\{p_{il2} | \forall i, l\}$, 即 $C_{\max} \geq 2tb + b/4$ 。若等号成立, 则当且仅当 t 个工件组在两阶段上均连续加工, 且具有阻塞约束的工件的阻塞时间均为0。现假设三划分问题无解, 则至少存在一个子集 $T_\eta (1 \leq \eta \leq t)$, 使得 $\sum_{a_j \in T_\eta} a_j < b$, 与此同时至少存在一个子集 $T_\mu (\mu \neq \eta)$, 使得 $\sum_{a_j \in T_\mu} a_j > b$ 。对于子集 T_η , 虽然 $\sum_{a_j \in T_\eta} a_j < b$, 但由于约束(6)的限制, 与之对应的工件组 J_η 的完工时间不会减少, 也不会造成后续工件完工时间的提前或后延。对于子集 T_μ , 由于 $\sum_{a_j \in T_\mu} a_j > b$, 工件组 J_μ 内的工件 $J_{\mu5}$ (存在阻塞约束) 在第1阶段的加工过程中必将发生阻塞, 这会延迟该工件在两阶段上的完工时间。若 J_μ 为最后加工的工件组, 则制造期必大于 z ; 若 J_μ 存在紧后工件组, 则会导致紧后工件组在两阶段上的开工时间均后延, 制造期将同样大于 z 。综上, 若给定调度实例的 $C_{\max}$ 不超过阈值 z , 则三划分问题必有解。□

3 求解算法设计

由于问题 $F_2|gs, \text{block}^*|C_{\max}$ 是强NP难的, 精确算法无法在有限时间内获得问题解, 不能满足实际应用需求, 而智能优化算法为解决这类问题提供了一种有效途径。分布估计算法 (estimation of distribution algorithm, EDA) 是一种新颖的智能优化算法, 与遗传算法相比, EDA 利用概率模型的统计学习取代了原有的交叉与变异操作, 在解决组合优化问题方面具有很强的优势^[8]。协同进化是一类联合决策问题的优化策略, 现已成功地应用于遗传算法、粒子群算法等^[9]。考虑到问题 $F_2|gs, \text{block}^*|C_{\max}$ 包含工件组间排序和工件组内工件间排序两个子问题(下文将

这两个子问题分别记为 P_{inter} 和 P_{inner}), 具有联合决策的特征, 本节设计一种基于协同进化的分布估计算法 (co-evolutionary estimation of distributed algorithm, CEDA). 该算法对子问题 P_{inter} 和 P_{inner} 进行独立编码, 针对其各自特征设计相应的启发式规则来构造初始种群, 并提出一种带有工件区块结构特征的概率模型来分别指导子种群的进化.

3.1 编码策略

对于 $F_2|_{\text{gs, block}^*}|C_{\text{max}}$, CEDA 将 P_{inter} 中的染色体设置为一个 $1 \times n$ 的向量 (记为 α), 每条染色体代表着工件组间的一个调度序列; 将 P_{inner} 中的染色体设置为一个 $n \times m$ 的矩阵 (记为 β), m 为所有工件组内工件数量的最大值, β 中第 i 行表示工件组 J_i 内工件间的一个调度序列, 对于工件数量小于 m 的工件组, 用 0 填充以满足矩阵的完整性. 决策对 (α, β) 表示一个完整解. 假设工件组集合为 $\{J_1, J_2, J_3\}$, 每个工件组包含的工件数量分别为 3、4、5, 下式给出了一个完整解的组合方案:

$$\alpha = [1, 3, 2], \beta = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & 5 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix}.$$

由 α 可知, 工件组间的加工顺序为 J_1 、 J_3 、 J_2 ; 结合 β , 该调度方案所有工件的加工顺序为

$$\{J_{12}, J_{11}, J_{13}\}, \{J_{32}, J_{35}, J_{34}, J_{33}, J_{31}\}, \\ \{J_{23}, J_{22}, J_{21}, J_{24}\}.$$

3.2 构造初始种群

为使 CEDA 算法能在较短时间内获取优质解, 本节根据子问题 P_{inter} 和 P_{inner} 的特点设计不同的调度策略来构造其初始种群. 对于 P_{inter} , 本文基于各工件组内无阻塞约束工件的数量设计混合 Johnson 和邻域插入的启发式规则来构造其初始种群. 即对于染色体 β 中的每一个行向量 $\beta(i)$, 假定与之对应工件组 J_i 内无阻塞约束工件的数量为 r_i , 则 J_i 内工件间的调度序列可按如下规则生成.

规则 1: 若 $r_i = n_i$, 则对 J_i 内所有工件按 Johnson 规则构造初始调度序列.

规则 2: 若 $r_i < n_i, r_i \neq 0$, 则首先对 J_i 内的非阻塞工件按 Johnson 规则排序, 令其排序结果为 S_1 ; 然后以 S_1 为基准随机寻找插入点, 将 J_i 内的阻塞工件逐个插入 S_1 中形成初始调度序列.

规则 3: 若 $r_i = 0$, 则采用完全随机的方式构造初始调度序列.

对于子问题 P_{inter} , 在确定各工件组内工件间加

工顺序的情况下, 本文借鉴文献 [1] 中工件组间的排序策略 (在所有工件均无阻塞约束的情况下具有最优性) 来确定工件组间的加工顺序. 该策略首先根据下式计算每个工件组 J_i 在两个阶段上的累计空闲时间 (分别记为 A_i 、 B_i):

$$A_i = C_{i2} - \sum_{l=1}^{n_i} p_{il2}, \quad (16)$$

$$B_i = C_{i2} - C_{i1}; \quad (17)$$

然后将 A_i 、 B_i 按照 SPT-LPT 规则进行排序, 以此来确定工件组间的加工顺序.

3.3 个体评价策略

由 3.1 节的编码策略可以看出, 种群 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 和 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 中染色体排列组合方案的数量分别为 n 和 $\sum_{i=1}^n (n_i!)$, 因此 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 具有更大的搜索空间, 且在对算法的测试中发现, $\text{pop}_{\text{inner}}$ 中染色体排列方案的改变对 C_{max} 值的影响更大. 故本文采用具有较强多样性的 k -random 策略^[10] 为种群 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 选取合作者; 采用具有较强针对性的贪婪策略^[11] 为种群 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 选取合作者, 根据合作者来构造完整解, 进而计算其适应值 ($1/C_{\text{max}}$).

3.4 概率模型的初始化及更新

对于 $F_2|_{\text{gs, block}^*}|C_{\text{max}}$, 工件组和工件间的前后作业顺序及其在染色体中的位置是决定染色体优劣的两个主要因素. 在已有针对置换序列编码的 EDA 中, 目前主要使用基于群体的增量学习方法来构建和更新概率模型, 但该方法仅考虑了优势群体集中基因之间的位置信息, 未考虑不同基因之间的前后顺序关系. 为将优势染色体集中具有相同位置和作业顺序的优势基因区块有效地赋值给子代种群, 本文设计一种带有工件 (组) 区块结构特征的概率模型来分别指导种群 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 和 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 进化. 以 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 为例, 第 t 代进化时的概率模型可用一个 $n \times n$ 的矩阵 P^t 来表示, P^t 中元素值 p_{ij}^t 表示工件组 J_i 被安排在位置 j 上的概率, 其值可由下式计算得到:

$$p_{ij}^t = \frac{\eta_{ij}^t \times \mu_{ij}^t}{\sum_{l \in \Omega_j} (\eta_{il}^t \times \mu_{il}^t)}. \quad (18)$$

其中: η_{ij}^t 表示当前优势群体集中工件组 J_i 在位置 j 及其之前出现的次数, 其值反映了工件组的前后作业顺序对最优调度序列的影响; μ_{ij}^t 表示工件组 J_i 在位置 j 上出现的次数, 其值反映了工件组块结构的相似性; Ω_j 表示在位置 j 及其之前已参与调度的工件组集. 该概率模型可将优势群体集中相似作业顺序和

基因结构以最大的概率更新至下一代。

对于种群 $\text{pop}_{\text{inner}}$, 针对 β 内的每一个行向量, 采用同样的方式构造和更新概率矩阵, 并根据概率矩阵生成与之对应工件组内工件间的调度序列, 这里不再赘述。

3.5 算法步骤

$F_2|\text{gs, block}^*|C_{\text{max}}$ 调度问题的 CEDA 算法步骤如下。

step 1: 初始化算法参数, 并根据启发式规则构造初始种群 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 和 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 。

step 2: 计算 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 和 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 中个体的适值, 记录当前最优完整解。

step 3: 根据适值从 $\text{pop}_{\text{inter}}$ 和 $\text{pop}_{\text{inner}}$ 中选取优势种群集。

step 4: 根据优势种群集更新概率模型, 并生成子代种群 $\text{off}_{\text{inter}}$ 和 $\text{off}_{\text{inner}}$ 。

step 5: 判断终止条件是否成立: 若成立, 则输出最优完整解和 C_{max} ; 否则, 令 $\text{pop}_{\text{inter}} = \text{off}_{\text{inter}}$, $\text{pop}_{\text{inner}} = \text{off}_{\text{inner}}$, 转至 step 2。

4 实验与分析

4.1 实验设计

由于未发现基于 $F_2|\text{gs, block}^*|C_{\text{max}}$ 调度问题的相关研究, 本文采集了某大型钢铁企业管加工车间的实际生产数据, 按模型参数对其进行整理, 得到由不同问题规模组成的 16 组样本数据。这些样本数据按照工件数量划分为 6 组小规模问题实例 ($n = \{3, 5, 7\}$ 和 $n_i = \{3, 5\}$ 正交组合) 和 10 组大规模问题实例 ($n = \{10, 20, 50, 100, 150\}$ 和 $n_i = \{5, 10\}$ 正交组合)。小规模问题实例用于测试算法的最优性, 大规模问题实例用于与其他元启发式算法进行对比。样本数据中其他问题参数设置如下: $p_{ilk} = \text{DU}[5, 40]$, $Y_{il} = \text{DU}[0, 1]$, 数据格式 $\text{DU}[a, b]$ 表示介于 a 与 b 之间的离散均匀分布。

实验中所有算法均使用 Matlab 语言编程实现, 采用 CPLEX 对模型进行求解, 代码测试环境为 Intel i5-6200U/CPU 2.40 GHz/8.0 GB。实验采用经典的相对偏差率 (percentage relative difference, PRD) 来衡量算法的有效性^[12], 计算公式为

$$\text{PRD} = \frac{C_{\text{max}}(A) - C_{\text{max}}^{\text{best}}}{C_{\text{max}}^{\text{best}}} \times 100. \quad (19)$$

其中: $C_{\text{max}}(A)$ 表示当前测试算例算法 A 所求解的 C_{max} 值, $C_{\text{max}}^{\text{best}}$ 为所有算法求得的最好 C_{max} 值。

根据前期测试, 针对本文问题, 将 CEDA 参数设定为: 种群规模 $p_{\text{size}} = 100$, 合作者的选取个数 $k =$

10, 优势群体集的规模 $\eta = 7$, 迭代次数 $\text{gen} = 150$ 。

4.2 最优性检验

针对 6 组小规模的问题实例, 每组随机生成 10 组测试算例, 分别使用 CPLEX 和 CEDA 进行求解, 使用 PRD 和成功率 (success rate, SR) 来检验 CEDA 的最优性。SR 为同组实验内 CEDA 得到最优解的算例数与总算例数的比值, 并记录每组实验两者的平均 CPU 耗时, 统计结果如表 1 所示。

表 1 最优性检验结果

$n \times n_i$	PRD	SR	CPU/s	
			η	gen
3×3	0.00	10/10	2.74	1.46
3×5	0.00	10/10	2.80	3.59
5×3	0.07	9/10	3.66	9.96
5×5	0.12	7/10	3.69	22.40
7×3	0.36	4/10	3.83	28.06
7×5	0.49	3/10	4.45	105.14
avg	0.17	$\approx 7/10$	3.53	28.43

由表 1 的实验结果可以看出, 6 组测试实验中 CEDA 的 PRD 平均值仅为 0.17%, 其中有两组实验的 PRD 值为 0, 这表明小问题规模下 CEDA 得到的 C_{max} 值与最优解的间隙非常小, 且对于大部分测试算例 (约 70%), CEDA 能够得到最优解。此外, 由运行时间可以看出, 随着问题规模的增加, CPLEX 的运行时间迅速增长, 而 CEDA 的运行时间增长十分缓慢且远小于 CPLEX, 这说明 CEDA 能够在较短的时间内得到接近于最优解的近优解。综上所述, 本文提出的 CEDA 具有很好的优化性能。

4.3 与元启发式算法对比

为验证 CEDA 及其关键策略的有效性, 实验设计了以下 4 种对比算法:

1) 传统遗传算法 (GA)。将子问题 P_{inter} 和 P_{inner} 作为一条染色体进行编码, 解码方式参见文献 [13], 进化机制参见文献 [14], 以验证本文 CEDA 算法的有效性。

2) 协同进化遗传算法 (CGA)。采用本文的编码和解码策略, 采用文献 [14] 的遗传进化机制对两个染色体种群执行进化操作, 并引入本文的初始种群构造策略及个体评价策略, 以验证本文分布估计进化机制的有效性。

3) 非协同进化的分布估计算法 (EDA)。将子问题 P_{inter} 和 P_{inner} 作为一条染色体进行编码, 采用本文的分布估计进化机制执行进化操作, 其他操作与 CEDA 保持一致, 以验证 CEDA 协同进化策略的有效性。

4) 不包含初始种群生成规则的协同进化分布估计算法(CEDA-I). 初始种群采用随机方式产生,以检验CEDA初始种群生成策略的有效性.

4种对比算法的参数设置如下:参见文献[14],将GA的种群规模设置为200,迭代次数为150,交叉、变异概率分别为0.9和0.5;将CGA中的交叉、变异概率同样设置为0.9和0.5,其他参数与CEDA相同;考虑到EDA为单条染色体进化,为避免因种群规模设置不

足对算法性能造成影响,实验中将其种群规模设置为CEDA的2倍,其他参数与CEDA保持一致;CEDA-I中所有参数设置同样与CEDA保持一致.

针对10组大规模的问题实例,每组随机生成10组测试算例,分别用上述5种算法进行求解,计算每种算法的PRD均值和标准差,并采用方差分析(analysis of variance, ANOVA)对5种算法PRD均值的差异性进行显著性检验,统计结果如表2所示.

表2 5种算法的PRD均值、标准差和方差分析统计结果(终止准则:迭代次数)

$n \times n_i$	CEDA		GA		CGA		EDA		CEDA_I		ANOVA($\alpha = 0.05$)	
	avg	std	avg	std	avg	std	avg	std	avg	std	F	P -value
10 $\times$ 5	2.24	0.26	9.89	0.96	4.52	0.63	4.37	0.77	3.24	0.80	83.36	1.71e-12
10 $\times$ 10	1.66	0.10	8.27	1.46	4.04	0.94	3.30	1.04	2.69	1.07	101.78	2.43e-26
20 $\times$ 5	1.38	0.34	8.15	1.26	3.81	1.19	2.61	1.27	2.46	1.21	103.52	3.48e-23
20 $\times$ 10	1.59	0.23	7.87	1.13	3.39	1.01	2.14	1.45	2.12	1.08	118.92	4.63e-28
50 $\times$ 5	0.97	0.24	8.73	1.39	2.87	1.23	2.67	1.20	2.04	1.23	93.61	2.69e-15
50 $\times$ 10	0.62	0.29	7.31	1.58	2.12	1.40	1.92	1.79	1.35	0.92	193.54	3.81e-29
100 $\times$ 5	0.59	0.36	7.97	1.26	1.86	1.32	1.99	1.68	0.98	0.79	229.88	4.50e-36
100 $\times$ 10	0.44	0.30	7.36	1.83	1.65	1.29	1.73	0.98	0.81	0.89	310.17	1.13e-45
150 $\times$ 5	0.41	0.26	6.89	1.01	1.49	0.85	1.58	0.74	0.73	0.96	273.75	4.87e-37
150 $\times$ 10	0.35	0.23	6.20	0.94	1.32	0.90	1.41	0.46	0.61	0.57	311.40	2.83e-46
平均值	1.03	0.26	7.86	1.28	2.71	1.08	2.37	1.14	1.70	0.95	182.00	1.73e-13

由表2统计结果可以看出:

1) 所有测试实验中ANOVA分析得到的 P -value值均接近于0,明显小于 α ,说明5种算法的求解质量存在显著性差异.此外,所有测试实验中CEDA求解的PRD值全部低于其他4种算法,这表明CEDA能取得相对较优的解.

2) 所有测试实验中GA的PRD值均为最大,这说明本文所提出的协同进化分布估计进化算法要远优于传统遗传算法.

3) CGA的PRD值是CEDA的PRD值平均2.63倍,最高3.77倍,这表明了本文所提出的分布估计进

化机制的有效性.此外,与GA相比,CGA的PRD均值平均降低了65.52%,这说明协同进化策略的存在能够有效指导算法进化.

4) 与EDA相比,所有测试实验CEDA和CEDA-I的PRD的平均值分别降低了56.79%、28.20%,这进一步表明了协同进化策略在寻找优质解方面的有效性.

5) 与CEDA-I相比,所有测试实验CEDA的PRD值的标准差平均降低了72.63%,这说明CEDA基于启发式规则的初始种群生成策略不仅具有较高的求解质量,而且求解性能相对稳定.

表3 5种算法的PRD均值、标准差和方差分析统计结果(终止准则:运行时间)

$n \times n_i$	CEDA		GA		CGA		EDA		CEDA_I		ANOVA($\alpha = 0.05$)	
	avg	std	avg	std	avg	std	avg	std	avg	std	F	P -value
10 $\times$ 5	2.45	0.45	9.53	1.19	4.54	0.94	4.42	1.04	3.37	0.83	77.13	5.26e-16
10 $\times$ 10	1.71	0.29	8.56	1.67	4.07	1.14	3.61	1.12	2.86	1.08	105.42	1.08e-20
20 $\times$ 5	1.64	0.53	8.05	1.38	3.92	1.47	2.74	1.75	2.83	1.52	191.02	1.89e-32
20 $\times$ 10	1.42	0.38	8.03	1.32	3.64	1.39	2.51	1.61	2.25	1.29	139.23	2.27e-23
50 $\times$ 5	1.15	0.35	7.79	1.59	3.41	1.61	2.78	1.50	2.23	1.15	155.20	1.96e-26
50 $\times$ 10	0.70	0.46	7.32	2.06	2.53	1.53	2.16	2.13	1.53	1.31	108.39	3.88e-21
100 $\times$ 5	0.65	0.49	7.08	1.65	2.51	1.57	2.35	2.07	1.21	1.24	124.05	5.97e-26
100 $\times$ 10	0.61	0.41	6.92	1.87	1.65	1.41	1.87	1.62	1.08	1.06	168.44	1.62e-29
150 $\times$ 5	0.54	0.32	6.65	1.13	1.57	0.88	1.82	1.29	1.01	1.09	223.13	6.95e-45
150 $\times$ 10	0.53	0.27	5.87	1.06	1.39	1.16	1.71	0.94	0.86	0.57	205.37	8.74e-34
平均值	1.14	0.40	7.58	1.49	2.92	1.31	2.60	1.51	1.92	1.11	149.74	5.26e-17

为进一步检验5种算法在相同运行时间的求解质量,本文采用运行时间为终止准则,对上述所有测试算例进行重新实验.实验方法如下:针对每组实验,根据问题规模设定算法的最大运行时间为 $\sum_{i=1}^n n_i/5\text{ s}$,使用5种算法对每组测试算例进行重新求解,实验结果如表3所示.

由表3的统计结果可以看出,每组实验得到的 P -value值均明显小于 α ,且所有测试实验CEDA的PRD均值全部低于其他4种算法,这说明在相同的运行时间下,CEDA依旧能够取得相对较优的解.另外,所有测试实验CEDA的PRD标准差同样全部低于其他4种算法,说明CEDA不仅具有较好求解质量,而且在稳定性方面优于其他4种算法.综上,表3的实验结果进一步表明了本文所提出的CEDA在求解调度问题 $F_2|gs, block^*|C_{\max}$ 时的有效性.

5 结 论

本文研究了一类带有特殊阻塞约束的两阶段流水车间成组调度问题,与已有阻塞约束不同,采用工件自身的属性来决定工件是否进行阻塞式加工.首先以最小化makespan为目标建立了混合整数线性规划模型;其次证明了该问题的强NP难特性,进而提出了一种基于协同进化的分布估计算法.该算法对工件组排序和各工件组内工件排序两个子问题进行独立编码,采用不同的启发式规则构造初始种群,并提出了一种带有工件区块结构特征的概率模型.通过不同规模的实验以及与对比算法的比较分析,表明了本文算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Yang D L, Chern M S. Two-machine flowshop group scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(10): 975-985.
- [2] Solimanpur M, Vrat P, Shankar R. A heuristic to minimize makespan of cell scheduling problem[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 88(3): 231-241.
- [3] Logendran R, Salmasi N, Sriskandarajah C. Two-machine group scheduling problems in discrete parts manufacturing with sequence-dependent setups[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(1): 158-180.
- [4] Naderi B, Salmasi N. Permutation flowshops in group scheduling with sequence-dependent setup times[J]. European Journal of Industrial Engineering, 2012, 6(2): 177-198.
- [5] Lin S W, Ying K C, Lee Z J. Minimizing makespan in a flow-line manufacturing cell with sequence dependent family setup times[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 15517-15522.
- [6] Logendran R, Sriskandarajah C. Two-machine group scheduling problem with blocking and anticipatory setups[J]. European Journal of Operational Research, 1993, 69(3): 467-481.
- [7] Solimanpur M, Elmi A. A tabu search approach for group scheduling in buffer-constrained flow shop cells[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24(3): 257-268.
- [8] Ceberio J, Irurozki E, Mendiburu A, et al. A review on estimation of distribution algorithms in permutation-based combinatorial optimization problems[J]. Progress in Artificial Intelligence, 2012, 1(1): 103-117.
- [9] 王柏琳, 王海凤, 李铁克. 工件可拒绝的有限等待置换流水车间调度算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(3): 459-469.
(Wang B L, Wang H F, Li T K. Scheduling algorithm for permutation flowshop with limited waiting times and rejection[J]. Control and Decision, 2019, 34(3): 459-469.)
- [10] Tan T G, Teo J, Hui K L. Competitive coevolution with K -random opponents for pareto multi-objective optimization[C]. International Conference on Natural Computation. Haikou: IEEE, 2007: 63-67.
- [11] Goh C K, Tan K C, Liu D S, et al. A competitive and cooperative co-evolutionary approach to multi-objective particle swarm optimization algorithm design[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 202(1): 42-54.
- [12] Wang B, Huang K, Li T. Permutation flowshop scheduling with time lag constraints and makespan criterion[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 120(1): 1-14.
- [13] Liou C D, Hsieh Y C, Chen Y Y. A new encoding scheme-based hybrid algorithm for minimising two-machine flow-shop group scheduling problem[J]. International Journal of Systems Science, 2013, 44(1): 77-93.
- [14] Liou C D, Hsieh Y C. A hybrid algorithm for the multi-stage flow shop group scheduling with sequence-dependent setup and transportation times[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 170(1): 258-267.

作者简介

袁帅鹏(1993—), 男, 博士生, 从事智能调度的研究, E-mail: shuaipengyuan@163.com;

李铁克(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进制造管理等研究, E-mail: tieke@ustb.edu.cn;

王柏琳(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事智能优化算法等研究, E-mail: wangbl@ustb.edu.cn;

余娜娜(1993—), 女, 博士生, 从事智能物流仓储的研究, E-mail: 1162912544@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)