

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.01.006

基于 GATS 混合算法的最优作业切换不相关 并行机成组调度研究

宋海草¹, 易树平², 吴昌友¹, 张顺堂¹, 邓冠龙³, 刘盼⁴, 魏雪梦¹

(1. 山东工商学院 管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044;
3. 鲁东大学 信息与电气工程学院, 山东 烟台 264005; 4. 河南农业大学 信息管理学院, 郑州 450002)

摘要:不相关并行机调度问题是车间调度中的典型问题,而单件小批量生产模式导致频繁的作
业切换和大量的作业切换时间,降低了设备利用率和生产效率。文中提出了基于成组技术的排序
依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题研究。根据工件加工所需资源的相似性进行工件聚类
成组,满足机器约束条件确定所有工件组在各机器上的分配,以及确定同一台机器上的各工件组以
及组内的排列顺序。以最小化总拖延时间为优化目标构建了数学模型,应用了遗传禁忌搜索
(GATS)算法进行求解,针对不同规模的问题分别对比人工蜂群(ABC)算法和遗传模拟退火
(GASA)算法进行案例研究。对比结果显示文中提出的算法具有较好的寻优能力。

关键词:不相关并行机;调度;作业切换时间;成组技术;遗传禁忌搜索算法

中图分类号:TP278

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)01-053-11

Research on group scheduling of optimal setup uncorrelated parallel machine based on GATS hybrid algorithm

SONG Haicao¹, YI Shuping², WU Changyou¹, ZHANG Shuntang¹,
DENG Guanlong³, LIU Pan⁴, WEI Xuemeng¹

(1. School of Management Science and Engineering, Shandong Technology and Business University,
Yantai 264005, Shandong, P. R. China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China; 3. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University,
Yantai 264005, Shandong, P. R. China; 4. College of Information and Management Science Henan
Agricultural University, Zhengzhou 450002, P. R. China)

Abstract: The uncorrelated parallel machine scheduling problem is a typical problem in the workshop
scheduling, and the single piece small batch production mode leads to frequent job switching and a large
number of setup times, which reduces equipment utilization and production efficiency. This dissertation
presents a research on the scheduling of uncorrelated parallel machines based on the grouping technique,
which is dependent on the setup time. According to the similarity of the resources required for workpiece
processing, the workpieces are clustered and grouped, and with machine constraints condition met, the
allocation of all the workpiece groups on the machines as well as the order of the workpiece groups and that

收稿日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403180,41601593);山东省自然科学基金资助项目(ZR2019QF008)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61403180, 41601593), Natural Science
Foundation of Shandong Province (ZR2019QF008).

作者简介:宋海草(1980—),女,博士,副教授,主要从事生产运作管理研究,(E-mail)songhaicao@sina.com。

within each group on the same machine is determined. In this paper, a mathematical model is constructed with the minimization of total delay time as the optimization goal and genetic tabu search (GATS) algorithm is applied to solve it. Artificial bee colony (ABC) algorithms and genetic simulated annealing (GASA) algorithms are used for case studies. The comparison results show that the proposed algorithm has better searching ability.

Keywords: uncorrelated parallel machine; scheduling; setup time; group technology; GATS hybrid algorithm

并行机调度是对多台机器的资源配置和作业排序,以及单台机器上工件的加工顺序进行优化研究。根据机器特征分为同构并行机和不相关并行机。由于机器新旧程度、规格、型号等不同,导致加工速度不同,并且相同工件的作业切换时间也不同。目前,多数的并行机生产调度研究主要是同构并行机调度研究,不能有效地解决实际生产调度问题,文中研究的不相关并行机成组调度问题具有实际应用价值。

Lee Jae-Ho 等^[1]提出禁忌搜索算法解决排序和机器依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题,数学模型为 $R_m | S_{ijk} | \sum T_j$, R_m 表示不相关并行机, S_{ijk} 表示机器和排序依赖作业切换时间, $\sum T_j$ 表示总拖延时间,以最小化总拖延为优化目标。Chen J F^[2]研究了加工限制和作业切换的不相关并行机最小化最大拖延时间,文中提出了一种高效的基于引导启发式搜索,记录更新和禁忌列表的方法。Chen J F^[3]研究了排序和机器依赖作业切换时间并考虑工期约束的不相关并行机调度问题,提出一种有效的启发式模拟退火算法基于修正作业切换导致的拖延成本,设计提高了算法参数。Zeidi J R 等^[4]研究了排序依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题。考虑了工期约束,以最小化拖延和提早完工成本为目标,应用遗传模拟退火集成的元启发式算法进行求解。Lee J H 等^[5]以最小化拖延时间为优化目标,应用禁忌搜索算法求解了机器和排序依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题。Lin S W 等^[6]为解决不相关并行机调度问题,提出了一种混合人工蜂群(HABC)算法,以最小化完工时间为优化目标。Gedik R 等^[7]研究了排序独立作业切换时间并考虑工期约束的不相关并行机生产调度问题,提出约束规划(CP)模型。轩华等^[8]研究了以最小化最大完工时间为目标的不相关并行机环境下带恶化工件的车间调度问题,建立了数学规划模型,应用改进遗传算法进行模型求解。C M Nogueira J P 等^[9]研究了最小化总提早和拖延惩罚的不相关并行机调度问题,考虑了机器、排序依赖作业切换时间和释放时间 3 个因素。提出了基于贪婪随机自适应搜索过程(GRASP)启发式的算法。Lin S W 等^[10]针对排序依赖作业切换时间和不相关并行机调度问题,提出了一个简单的迭代贪婪式启发算法来求解最小化总拖延目标。Diana R O M 等^[11]针对排序依赖作业切换时间和不相关并行机调度问题,提出了免疫算法来求解最小化完工时间的优化目标。刘美瑶等^[12]针对考虑预防性维修的分布式不相关并行机调度问题,以最小化最大完工时间为优化目标,提出了一种新型人工蜂群算法进行问题求解。

上述文献主要分别以最小化完工时间和最小化总拖延为优化目标构建了模型,研究了不相关并行机调度问题,个别文献考虑了排序依赖作业切换时间。研究主要应用了遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、禁忌搜索算法(TS)、粒子群优化算法(PSO)、人工蜂群(ABC)算法等智能算法进行求解作业车间调度问题。然而单一智能算法在复杂优化问题求解方面各自存在一定的劣势,导致算法的优化结果不够好。比如,遗传算法实现算子的参数选择大部分靠经验,如交叉率和变异率等参数设置,并且遗传算法对初始种群的选择具有一定依赖性,可以结合一些启发算法进行改进。禁忌搜索算法和模拟退火算法是基于个体的元启发式算法,其中,禁忌搜索算法受禁忌长度、特赦规则和候选集大小的影响。模拟退火算法存在收敛速度慢,执行时间长,算法性能与初始值有关及参数敏感等问题。粒子群算法和人工蜂群算法是基于群体的元启发式算法,其中粒子群算法对于离散的优化问题处理不佳,容易陷入局部最优。为此,国内外学者提出基于融合思想的智能算法改进策略^[13]。

为满足客户的个性化需求,多品种、小批量的生产模式成为离散制造企业的主要生产模式,该模式导致了频繁的作业切换和大量的作业切换时间,并且不同作业排序的不相关并行机的作业切换时间和加工时间

不等,对于产品生产周期和生产效率都有影响。因此,文中研究了排序依赖作业切换时间不相关并行机调度问题,应用 GATS 混合算法进行问题求解,通过实例验证了混合算法的寻优能力。

1 问题描述

研究基于成组技术的排序依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题,优化目标为最小化总拖延时间,根据工件加工所需资源的相似性进行工件成组,要确定所有工件组在各机器上的分配,以及确定同一台机器上的各工件组以及组内的排列顺序,不同的排列顺序,产生不同的作业切换时间,以及不同的总拖延时间(T_i)。该问题的数学规划模型($R_m/s_{ijm}/\sum T_i$)可以描述为,有 n 个工件组在 m 台机器上加工,调度优化决策包括 2 个阶段,一是工件组—机器的匹配优化,二是根据工期和作业切换时间对分配到机器上的工件组以及组内工件的加工排序进行优化。文中应用了遗传禁忌搜索(GATS)算法进行模型求解,对不同规模的问题分别对比人工蜂群(ABC)算法和遗传模拟退火(GASA)算法进行案例研究。

2 模型构建

2.1 模型假设

文中提出如下假设:1)所有机器在 $t=0$ 时刻都可以使用;2)假设工件同时到达,不考虑机器的等待时间;3)每台机器的加工速度不同,相同工件在不同机器上的加工时间不同;4)每个工件在操作中不能中断;5)每台机器每次最多加工一个工件;6)工件没有加工特权;7)假设工件可以在任意机器上加工;8)排在机器第一位加工工件存在初始作业切换时间。

2.2 参数及变量描述

具体参数及变量如表 1 所示。

表 1 参数及变量表

Table 1 Parameters and variables

指标	
i, j	工件指标($i, j=1, 2, \dots, n$)
k	机器指标($k=1, 2, \dots, m$)
参数	
$p_{i,k}$	工件 i 在机器 k 上的加工时间
s_{ijk}	在机器 k 上工件 i 切换到工件 j 依赖排序的作业切换时间
d_i	工件 i 的工期;
M	足够大的正数
决策变量	
x_{ik}	当工件 i 在机器 k 上加工则为 1, 否则为 0
y_{ijk}	在机器 k 上工件 i 排在工件 j 紧前加工为 1, 否则为 0
C_i	工件 i 的完工时间
T_i	工件 i 的完工拖延时间

2.3 模型建立

优化目标

$$\min \text{mize} \sum_{i \in G} T_i, \quad (1)$$

满足

$$\sum_{i=0}^n x_{ik} = 1, k = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ijk} \leq x_{ik}, j \neq i, i = 0, 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ijk} = x_{jk}, j \neq i, i = 0, 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{0jk} = 1, i = 0; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$C_j \geq C_i + p_{jk} + y_{ijk} - M \times (1 - y_{ijk}), j \neq i, i = 0, 1, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$C_0 = 0, \quad (7)$$

$$C_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$T_i = \max\{C_i + d_i, 0\}, \quad (9)$$

其中,式(2)说明每个工件只能在一台机器上加工 1 次;式(3)和式(4)说明 2 个工件恰好在同一台机器上紧前和紧后加工;式(5)说明每台机器都存在初始作业切换时间;式(6)紧前紧后工件完工时间包含作业切换时间;式(7)设排在第一位加工工件前有虚拟工件,其完工时间为 0;式(8)每个工件都被加工;式(9)计算每个工件的拖延时间。

3 算法设计

将 GA 和 TS 算法各自优点紧密结合起来,能够得到具有较强的全局搜索能力和局部搜索能力的遗传禁忌搜索算法(GATS)。GA 和 TS 算法整合起来,能够优缺点互补。李大卫等^[14]将禁忌搜索算法的记忆思想融入到遗传算法的搜索过程中,形成新的重组算法,并把禁忌搜索算法作为遗传算法的变异算子。方叶祥等^[15]研究了基于遗传禁忌算法的双资源约束下并行生产线调度研究,交叉算子中引入了记忆功能,来避免早熟现象,对于交叉产生的个体,根据设置禁忌表确定被舍弃还是接受,引入藐视准则来保留优良个体。采用禁忌搜索算法作为变异算子,把一个要变异的染色体作为禁忌搜索的输入,把禁忌搜索得到的解作为变异的新个体。将 TS 独有的记忆功能引入 GA 的搜索过程中,利用 TS 爬山能力强的优点,使用 TS 改进 GA 的爬山能力,构建新的交叉算子,TSR 算子作为交叉算子。把 TS 作为 GA 的变异算子 TSM。遗传禁忌算法(GATS)结合了具有多出发点的 GA,以及具有爬山能力强和记忆功能特点的 TS,保持了 GA 具有多出发点的优势,克服了 GA 爬山能力差的缺点。

3.1 种群初始化

初始的染色体设计方案能有效缩短算法运行时间,向量整数规划元启发算法是典型的染色体应用于并行机调度问题。一个 n 个数列的两行排列应用于染色体表达, n 表示工件数量,第一行数列表示工件的一种排列,从 $1 \sim n$,第二行的每个元素对应第一种群由染色体的规模种群组成,每一条染色体就是问题的一种候选方案。适当行每个工件加工的机器,同一台机器上第一行越早出现的工件表示排在越靠前的位置进行加工。染色体的表达如图 1 所示。工件分配如图 2 所示。工件交叉操作如图 3 所示。

工件	6	3	7	2	8	1	4	5
机器	2	1	3	2	3	1	2	1

图 1 染色体表示

Fig. 1 Chromosome representation

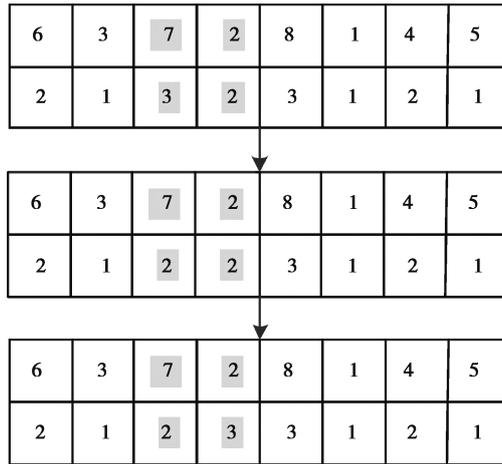


图 2 工件分配

Fig. 2 Jobs reallocation

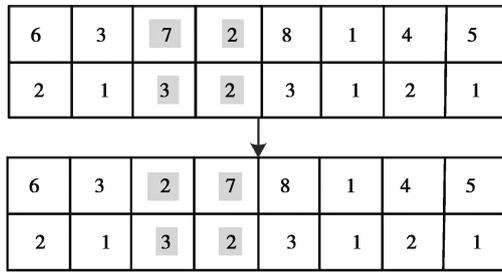


图 3 工件交叉操作

Fig. 3 Jobs crossover operator

3.2 适应度函数

每条染色体评价的适应度函数为

$$f(x) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \max\{C_i - d_i, 0\}}, x = 1, 2, \dots, pop_size, \tag{14}$$

式中, $f(x)$ 是种群中第 x 条染色体的适应度函数值; $\sum_{i=1}^n \max\{C_i - d_i, 0\}$ 是所有工件的总拖延时间。

3.3 获得初始解

禁忌搜索算法搜索的最优解比较依赖初始解。遗传算法通过选择、交叉、变异等操作产生的可行解作为禁忌搜索算法的初始解,能够有效的缩短禁忌搜索时间。禁忌搜索算法再根据工件加工优先指标对初始解进行优化排序。考虑将优先权指标值最大的工件首先安排在机器上加工。修正的优先权指标^[16]表示为。

$$I_j(t, i) = \frac{1}{p_{jk}} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_{jk} - t, 0)}{k_1 \bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ijk}}{k_2 s}\right), \tag{18}$$

其中: $I_j(t, i)$ 表示工件 j 在 t 时刻的优先权指标, i 是 t 时刻最后一个在机器上完成的工件, t 时刻最大指标值的工件被选择加工; p_{jk} 是工件 j 在机器 k 上的加工时间; s_{ijk} 是在机器 k 上工件 j 安排在工件 i 紧后加工, 排序依赖机器的作业切换时间; d_j 是工件 j 的工期; k_1 和 k_2 是标度参数, 由 τ, R, η, μ 确定。 τ 为工期松紧系数, R 为工期阈值因子, η 为作业切换时间效率系数, μ 为工件—机器因子。

$$k_1 = 1.2 \ln(\mu) - R, \tag{19}$$

$$k_2 = \frac{\tau}{A \sqrt{\eta}}, \tag{20}$$

如果 $\tau < 0.5$, 则式(19)中 k_1 还要减去 0.5; 如果 $\tau < 0.8$, 式(20)中 $A = 1.8$, 当 $\tau \geq 0.8$, 则 $A = 2$; 如果 $\eta <$

0.5 并且 $\mu > 5$, 则 k_1 还要减去 0.5。

工期松紧系数计算如下^[17-18]。

$$\tau = 1 - \left(\frac{\bar{d}}{C_{\max}} \right), \quad (21)$$

其中: \bar{d} 为平均工期; C_{\max} 为最大完工时间, 如果 τ 接近 1 说明生产调度任务很紧密, 完工时间无限大。

工期阈值因子计算为

$$R = (d_{\max} - d_{\min}) / C_{\max}, \quad (22)$$

其中: d_{\min} 为最小工期; d_{\max} 为最大工期。

作业切换时间效率系数计算为

$$\eta = \bar{s} / \bar{p}, \bar{s}, \quad (23)$$

其中: \bar{s} 为平均作业切换时间; \bar{p} 为平均加工时间。

$$\bar{p}_i = \sum_{k=1}^m p_{ik} / m. \quad (24)$$

工件—机器因子(μ)计算为

$$\mu = N / M, \quad (25)$$

其中: N 为工件数; M 为机器数; μ 是一台机器上加工工件的平均数^[18]。这些参数具体值依赖实际问题。对于规模较大的工件排序, C_{\max} 较难计算, 采用估算公式^[16]。

$$\hat{C}_{\max} = (\beta \bar{s} + \bar{p}) \mu, \beta \leq 1, \quad (26)$$

其中: β 是针对 μ 充分大时给出的评估因子(比如 $\mu \geq 5$), 其计算公式为

$$\beta = 0.4 + \frac{10}{\mu^2} - \frac{\eta}{7}. \quad (27)$$

3.4 邻域生成方法

邻域映射为对换 2 种工件的加工顺序位置的 2-opt, 由于多个机器, 每个机器上的工件位置顺序都可以变换, 也存在同时变化的情况, 比较复杂。文中生成了一个 $1 \sim m$ 的随机整数, 由这个随机整数确定变化哪个机器上的工件以及各机器上的先后顺序^[2-3]。比如, 有 3 台机器($m=3$), 5 种工件($n=5$)的情况, 在某次由当前最优解产生其邻域时, 产生 $1 \sim 3$ 的随机整数位 2, 则变化第 2 台机器的位置顺序。具体邻域生成方法如图 4 所示。

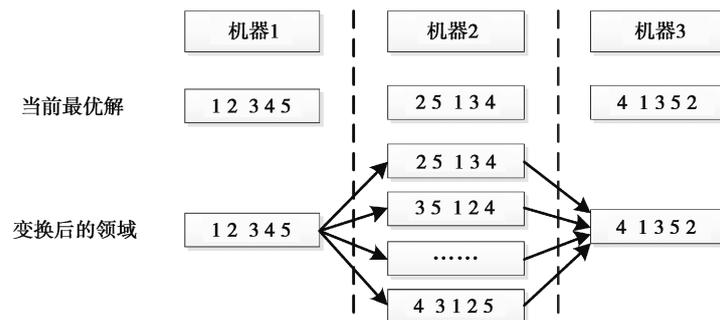


图 4 邻域产生方法

Fig. 4 Neighborhood generated method

禁忌搜索算法包括 8 种邻域生成方法。都是基于交换和插入方法。 $n * m$ 个操作的基因表示, 代表一次操作的优化组合, n 个工件 m 台机器。机器的拖延时间是指分配到该台机器上加工的所有工件的总拖延时间。带下标的工作组是指分配在某台机器上连续延迟或者早到的工件群。

Step1: 子工件组再分配, 基于插入方法。从最大拖延机器上任意选择的子工件组中移动一组连续工件, 将它们插入到最小拖延机器上。这里所说的连续的工件组, 是指从任意选择的子工件组里第一个工件开始。

Step2: 工件再分配。这种方法与子工件组再分配方法相同, 只不过工件替代了工件组被选择和插入。也就说分配到最大拖延机器上的工件从原始位置被移动, 并且插入到任意位置, 其分配的排序是在最小化拖

延机器上,分配到最大拖延机器上的工件是被随意选择的。

Step3: 子工件组和子工件组链再分配。从最大拖延机器上选择的子工件组被任意分配到中间机器,并且另外的子工件组从中间机器上被再分配到最小化拖延机器上。

Step4: 子工件组和工件链再分配。这种方法与子工件组和子工件组链再分配是一样的。只是从中间机器上被选择的是一个工件而不是一个工件组,其被再分配到最小化拖延机器上。

Step5: 工件和工件链再分配。方法与子工件组与子工件组链的再分配方法相同,只是两个再分配(从最大拖延机器到中间机器和从中间机器到最大拖延机器)对象是工件而不是工件组。

Step6: 子工件组和子工件组交换。基于交换方法生成邻域方案,通过选择两个子工件组并且互相交换。特别是,从最大拖延机器上选择一个子工件组与另外任意机器上的子工件组进行交换。

Step7: 机器间的工件交换。这种方法与子工件组交换相同,但是指的是两个工件交换而不是子工件组交换。也就是说,从最大拖延机器上选择一个工件与任意其他机器上的工件进行交换。

Step8: 分配在一台机器上的工件间的交换。这种方法与机器间的工件和工件交换方法一样,只是交换的两个工件是任意机器上分配的工件。

3.5 交叉、变异操作

将禁忌搜索的记忆功能引入到遗传算法的交叉算子中,即 TSR 的交叉过程具有高适应值的子代进入到下一代的机会很大,但不是所有的高适应值的子代一定都进入到下一代,因为 TSR 使用了禁忌表,可以限制适应值相同的子代出现次数,使得群体中尽可能保持染色体结构的多样性,避免早熟现象。

将禁忌搜索作为遗传算法的变异算子,即 TSM 输入一个解(染色体)作为初始解,经 TSM 作用,返回再输出另一个解。TSM 是一个搜索过程,需要评价函数确定移动值,并根据移动值和禁忌表决定接受哪个移动,即确定接受哪个输出解,TSM 搜索过程中可以接受劣解,TSM 具有极强的爬山能力。

遗传禁忌搜索算法的具体流程图如图 5 所示。

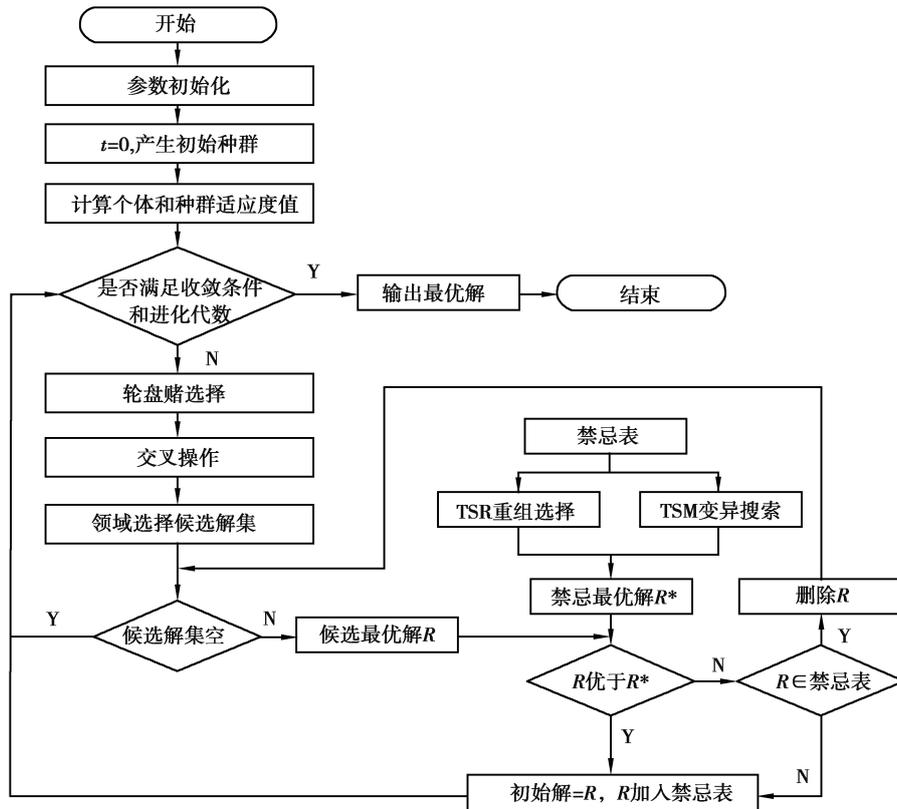


图 5 遗传禁忌搜索算法流程图

Fig. 5 The flow chart of GATS algorithm

4 算法有效性验证

4.1 数据生成

研究基于成组技术的排序依赖作业切换时间的不相关并行机调度问题($R_m | s_{ijm} | \sum T_i$)。以最小化总拖延时间为优化调度目标,即 Minimize $\sum T_i$ 。对于大规模问题,由于完工时间不能准确计算,根据最小的加工时间和作业切换时间对其进行估算,工期阈值因子(R)为 $[0.4, 1]$,工期松紧系数(τ)为 $[0.4, 0.8]$,具体参数设置^[1,3,4,10],如表 2 所示。

表 2 参数设置
Table 2 Parameter settings

因子	数值
工件数(N)	30,50,70,90
机器数(M)	4,6,8
工件组数(F)	$[N/7]+1, [N/8]+1$
工期松紧系数(τ)	0.4,0.8
工期阈值因子(R)	0.4,1
工件组 j 在机器 k 上的加工速度因子, f_{jk}	$1/U[5,15]$
工件组 j 在机器 k 上的加工时间, p_{jk}	$1/f_{jk} \times U[10,40]$
在机器 k 上工件组 i 与工件组 j 的作业切换时间, s_{ijk}	$U[10,100]$
工期 α	$U[C_{\max}(1-\tau-R/2), C_{\max}(1-\tau+R/2)]$

$$C_{\max} = \left(\sum_{j \in F} \sum_{k \in M} (p_{jk} + (\sum_{i \in F} s_{ijk})/F/M) \right) / M。$$

4.2 参数设置

根据田口试验得出最优参数组合为 $N_{\text{pop}} = 60, N_{\text{gen}} = 150, P_c = 0.6, P_m = 0.12, P_s = 0.25, L = 10, n_s = 15$ 。Chen^[3]创建了 960 个试验问题,考虑了 6 个因子:工件数量(N),机器数量(M),工件组数量(F),工期优先因子(τ),工期范围因子(R),重要客户工件优先度因子(P)。文中借鉴了文献[3]考虑了 5 个因子:工件数量(N),机器数量(M),工件组数量(F),工期松紧系数(τ),工期阈值因子(R),假设工件重要程度相同。表 3 分别包含 4 种工件数(N),3 种机器数(M),2 种工件组数量(F),2 种工期松紧系数(τ),2 种工期阈值因子(R)。生成 5 个实例,测试数据集为 $4 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 = 96$ 个测试问题,总的测试实例为 $4 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 5 = 480$ 个。

4.3 计算结果

GATS 算法分别对比了 ABC 算法^[20]和 GASA 算法^[4]。算法运行机器性能参数为 PC 上 CORE i3 M 380,CPU 2.53 GHz,内存为 6.00 GB,运行软件为 Matlab R2010a。所有导入数据从 Excel 2010 读取,结果以 Excel 形式表现,运行时间指主程序的运行时间,不包括导入数据的时间。不同规模数据各测试 20 次,计算结果表示为 4 个参数:目标最小值(Min.sol),目标平均值(Avg.sol),目标最大值(Max.sol)和平均值提高率(%)。GATS 算法和 ABC 算法对比结果如表 3 所示,GATS 算法和 GASA 算法对比结果如表 4 所示。

表 3 ABC 算法与 GATS 算法对比结果

Table 3 Comparison between the results of the ABC and GATS algorithms

参数	取值	ABC 算法			GATS 算法			平均值提 高率/%
		Min.sol	Max.sol	Ave.sol	Min.sol	Max.sol	Ave.sol	
N	30	1 389.2	1 402.8	1 393.5	1 320.5	1 402.9	1 324.8	4.93
	50	2 903.7	3 001	2 939.7	2 560.2	2 835.6	2 745.1	6.62
	70	5 891.2	6 129.2	5 992.3	5 600.1	5 720.5	5 630.4	6.04
	90	9 649.3	10 054.1	9 838.3	9 099.3	9 242.1	9 184.1	6.65
M	4	7 590.2	7 819.7	7 693.7	6 950.4	7 154.6	7 060.5	8.23
	6	4 634.8	4 826.5	4 715.6	4 401.1	4 516.4	4 427.0	6.12
	8	2 650.1	2 794	2 713.6	2 436.8	2 594.5	2 490.5	8.22
F	N/7+1	4 956.8	5 149.3	5 042.1	4 685.4	4 801.7	4 718.9	6.41
	N/8+1	4 959.9	5 144.2	5 039.8	4 640.2	4 780.2	4 698.1	6.78
τ	0.4	1.3	1.6	1.4	0.4	0.8	0.5	65.21
	0.8	9 915.4	10 291.9	10 080.5	9 387.3	9 501.3	9 421.2	6.54
R	0.4	8 733.4	8 948.9	8 828.3	8 301.3	8 462.9	8 358.6	5.32
	1	1 183.3	1 344.6	1 253.6	1 001.2	1 187.4	1 032.7	17.62
平均值		4 958.35	5 146.75	5 040.95	4 644.94	4 784.68	4 699.41	11.90

表 4 GASA 算法与 GATS 算法对比结果

Table 4 Comparison between the results of the GASA and GATS algorithms

参数	取值	GASA 算法			GATS 算法			平均值提 高率/%
		Min.sol	Max.sol	Ave.sol	Min.sol	Max.sol	Ave.sol	
N	30	1 340.8	1 560.9	1 435.1	1 320.5	1 402.9	1 324.8	7.69
	50	2 666.9	3 174.6	2 882.6	2 560.2	2 835.6	2 745.1	4.77
	70	5 256.1	6 224.5	5 619.7	5 600.1	5 720.5	5 630.4	-0.19
	90	8 403.9	9 618.2	8 915.1	9 099.3	9 242.1	9 184.1	-3.02
M	4	6 382.8	7 460.3	6 808.5	6 950.4	7 154.6	7 060.5	-3.7
	6	4 271.8	4 981.7	4 558.4	4 401.1	4 516.4	4 427.0	2.88
	8	2 596.2	2 991.7	2 774.5	2 436.8	2 594.5	2 490.5	10.23
F	N/7+1	4 369.1	5 073.8	4 661.8	4 685.4	4 801.7	4 718.9	-1.23
	N/8+1	4 464.7	5 215.4	4 764.4	4 640.2	4 780.2	4 698.1	1.39
τ	0.4	0.66	6.9	2.9	0.4	0.8	0.5	82.75
	0.8	8 833.2	10 282.2	9 423.3	9 387.3	9 501.3	9 421.2	0.02
R	0.4	7 891.1	8 864.0	8 268.8	8 301.3	8 462.9	8 358.6	-1.09
	1	942.7	1 425.1	1 157.4	1 001.2	1 187.4	1 032.7	10.77
平均值		4 416.92	5 144.56	4 713.27	4 644.94	4 784.68	4 699.41	8.56

根据计算结果,大多数的试验问题是工期松紧系数较大即紧工期(比如 $\tau=0.8$),工期阈值比较小(比如 $R=0.4$),总体来说,GATS 算法的性能是好于 ABC 算法和 GASA 算法,3 种算法最优解的最小值、最大值、平均值如表 3 和表 4 所示。总拖延时间随着工件数和机器数的增加而增加。当 $R=0.4, \tau=0.8$ 时,总拖延时

间也在增加,GATS算法比 GASA 算法和 ABC 算法的目标最优解平均值分别提高了 11.90%和 9.93%,GATS算法的最小、最大、平均总拖延时间分别为 4 644.94,4 784.68,4 699.41。虽然,GATS算法有些最优目标平均值没有 GASA 算法结果好,但是总的平均值提高率总的平均为 8.56,结果标明 GATS 算法优于 GASA 算法。

5 结束语

在实际生产中由于机器新旧程度、规格型号的差异导致机器的加工速率不同,因此,文中研究了基于成组技术的最优作业切换的不相关并行机调度问题,考虑了工期以及排序依赖作业切换时间等约束条件,以最小化总拖延为优化目标。首先,应用成组技术确定了所有工件组在各机器上的分配;其次,确定了同一台机器上的各工件的排列顺序。工件组之间存在切换时间,不同的加工顺序,作业切换时间不同,并且相同工件在不同机器上的切换时间不同。应用 GATS 算法进行问题求解,引用相关文献案例对不同规模的调度问题对比了 ABC 算法和 GASA 算法运行结果,结果显示文中采用的 GATS 算法具有很好的寻找最优解的能力。

参考文献:

- [1] Lee J H, Yu J M, Lee D H. A tabu search algorithm for unrelated parallel machine scheduling with sequence-and machine-dependent setups: minimizing total tardiness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9/10/11/12): 2081-2089.
- [2] Chen J F. Minimization of maximum tardiness on unrelated parallel machines with process restrictions and setups[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 29(5/6): 557-563.
- [3] Chen J F. Scheduling on unrelated parallel machines with sequence-and machine-dependent setup times and due-date constraints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 44(11/12): 1204-1212.
- [4] Zeidi J R, Mohammad Hosseini S. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9/10/11/12): 1487-1496.
- [5] Lee J H, Yu J M, Lee D H. A tabu search algorithm for unrelated parallel machine scheduling with sequence-and machine-dependent setups: minimizing total tardiness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9/10/11/12): 2081-2089.
- [6] Lin S W, Ying K C. ABC-based manufacturing scheduling for unrelated parallel machines with machine-dependent and job sequence-dependent setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 51: 172-181.
- [7] Gedik R, Rainwater C, Nachtmann H, et al. Analysis of a parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times and job availability intervals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(2): 640-650.
- [8] 轩华, 秦莹莹, 王薛苑, 等. 带恶化工件的不相关并行机调度优化[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(5): 919-924.
XUAN Hua, QIN Yingying, WANG Xueyuan, et al. Optimization for unrelated parallel machine scheduling with deteriorating jobs[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(5): 919-924. (in Chinese)
- [9] C M Nogueira J P, Arroyo J E C, Villadiego H M M, et al. Hybrid GRASP heuristics to solve an unrelated parallel machine scheduling problem with earliness and tardiness penalties[J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2014, 302: 53-72.
- [10] Lin S W, Lu C C, Ying K C. Minimization of total tardiness on unrelated parallel machines with sequence-and machine-dependent setup times under due date constraints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(1/2/3/4): 353-361.
- [11] Diana R O M, de França Filho M F, de Souza S R, et al. An immune-inspired algorithm for an unrelated parallel machines' scheduling problem with sequence and machine dependent setup-times for makespan minimisation [J]. *Neurocomputing*, 2015, 163: 94-105.
- [12] 刘美瑶,雷德明.基于新型人工蜂群算法的分布式不相关并行机调度[J/OL].*控制理论与应用*:1-9.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20191022.1723.012.html>.
New artificial bee colony for distributed unrelated parallel machine scheduling[J]. *Control Theory & Applications* :1-9.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20191022.1723.012.html>. (in Chinese)
- [13] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社. 2004.

- WANG Ling. Intelligent optimization algorithms with applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.(in Chinese)
- [14] 李大卫, 王莉, 王梦光. 遗传算法与禁忌搜索算法的混合策略[J]. 系统工程学报, 1998, 13(3): 28-34.
LI Dawei, WANG Li, WANG Mengguang. Genetic algorithm and tabu search: a hybrid strategy[J]. Journal of Systems Engineering, 1998, 13(3): 28-34.(in Chinese)
- [15] 方叶祥, 钱存华, 蒋南云, 等. 基于遗传禁忌算法的双资源约束下并行生产线调度研究[J]. 运筹与管理, 2007, 16(5): 153-158.
FANG Yexiang, QIAN Cunhua, JIANG Nanyun, et al. Scheduling of parallel production lines based on hybrid genetic-tabu search algorithm for dual-resource constrained[J]. Operations Research and Management Science, 2007, 16(5): 153-158.(in Chinese)
- [16] 戚峰, 俞晶菁, 黄召杰. 基于禁忌搜索算法求解车间作业调度问题[J]. 兰州交通大学学报, 2011, 30(3): 79-85.
QI Feng, YU Jingjing, HUANG Zhaojie. Solving a job-shop scheduling problem based on a tabu search algorithm [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2011, 30(3): 79-85.(in Chinese)
- [17] Lee Y H, Pinedo M. Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 100(3): 464-474.
- [18] Lee Y H, Pinedo M. Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 100(3): 464-474.
- [19] Diana R O M, de Souza S R, Filho M F F. A Variable Neighborhood Descent as ILS local search to the minimization of the total weighted tardiness on unrelated parallel machines and sequence dependent setup times [J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2018, 66: 191-198.
- [20] Ying K C, Lin S W. Unrelated parallel machines scheduling with sequence-and machine-dependent setup times and due date constraints[J]. International Journal of Innovational Computing Information and Contro, 2012(8):1-19.

(编辑 陈移峰)