DOI: 10.3901/JME.2019.24.236

带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题

韩忠华^{1,2,3,4} 张 权² 史海波^{1,3,4} 张竞元²

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016;

2. 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168;

3. 中国科学院网络化控制系统重点实验室 沈阳 110016;

4. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110016)

摘要: 针对带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题, 提出一种改进的紧致遗传算法(Improved compact genetic algorithm, ICGA)与局部指派规则结合的方法来解决该问题。全局优化过程采用改进的紧致遗传算法, 为了克服紧致遗传算法(Compact genetic algorithm, CGA)易早熟收敛的问题, 提出一种基于高斯映射的概率模型更新方式, 在保持紧致遗传算法快速收敛特性的前提下, 扩展了种群中个体的多样性, 增强了算法进化活力。为减少生产阻塞和降低准备时间对排产过程的影响, 设计了多种局部启发式规则来指导工件进出多序列有限缓冲区的分配和选择过程。采用某客车制造企业中的实例数据进行测试, 测试结果表明, 改进的紧致遗传算法与局部指派规则配合使用, 能够有效解决带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题。

关键词: 柔性流水车间; 多序列有限缓冲区; 高斯映射; 改进的紧致遗传算法

中图分类号: TH186

Multi-queue Limited Buffer Scheduling Problems in Flexible Flow Shop with Setup Times

HAN Zhonghua^{1,2,3,4} ZHANG Quan² SHI Haibo^{1,3,4} ZHANG Jingyuan²

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Faculty of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168;

3. Key Laboratory of Network Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

4. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: Aiming at solving the multi-queue limited buffer scheduling problems in flexible flow shop with setup times, an improved compact genetic algorithm(ICGA) with local dispatching rules is proposed. Specifically, the global optimization process adopts ICGA algorithm. In order to overcome the issue of premature convergence of compact genetic algorithm (CGA), a Gaussian-mapping-based probabilistic updating method is proposed. Under the premise of maintaining the fast search feature of CGA, ICGA algorithm expand the diversity of population individuals and enhance the evolutionary vigor of the algorithm. In order to reduce the impact of production blocking and setup times on the scheduling process, multiple local heuristic rules are designed to guide the distribution and selection process of the jobs into and out of the multi-queue limited buffer. The instance data in a bus manufacturing enterprise is used for testing. The test results show that the ICGA algorithm combined with local dispatching rules can effectively solve the problem of multi-queue limited buffer scheduling problems in flexible flow shop with setup times.

Key words: flexible flow shop; multi-queue limited buffer; Gaussian mapping; improved compact genetic algorithm

* 国家自然科学基金(61873174)、辽宁省重点研发计划指导计划(2018106008)、辽宁省高等学校基本科研(LJ2017015)和沈阳市科技计划双百工程(Z18-5-015)资助项目。20180816 收到初稿, 20190328 收到修改稿

0 前言

客车制造企业采用客户定制化的生产方式,每天投产的生产订单中车型种类繁多,不同的车型在同一个工序加工工时也不相同,在承装车间之前的焊装和涂装生产车间,具有多工序多并行工位的特点,是典型的柔性流水车间。定制化的生产方式带来客车的加工工时和工艺流程的差异,并且客车生产周期较长,需要大量的缓冲区车位来临时停放等待加工的客车。又由于客车属于大体积在制品,客车生产线上只能设置车位数量有限的缓冲区,所以客车制造企业排产优化问题属于柔性流水车间有限缓冲区排产优化问题的范畴。在实际生产中,由于焊装车间和涂装车间生产节拍的差异较大,在焊装下线的客车车体需要较大容量的缓冲区进行临时停放,而此阶段客车车体未安装带发动机的底盘,只能承载在滑撬上移动。所以为了便于生产管控和更有效的布设移行机,将其缓冲区划分成多个车道,每个车道可以存放多辆客车车体。车体从车道的一侧进入车道,由移行机带动滑撬在车道中移动,最后移出车道,在每个车道中形成一个等待加工序列,多个车道中同时存在多个等待加工的序列,这些等待加工的序列共同构成了一个多序列有限缓冲区。同时,在涂装车间的生产过程中如果客车车型和颜色等属性信息与工位生产的前一个客车的属性信息不同时,加工工位需要进行清理和器材调整等工作,这会导致在基本加工时间之外增加一个准备时间。因此,客车制造企业中存在的这类排产优化问题可以归结为带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题。

受到车间实际物理空间的限制,有限缓冲区排产优化问题更契合工程实际需求,因此近年来该问题的研究得到越来越多的关注。ZHAO等^[1]提出具有线性减小的干扰项改进的粒子群优化(LDPSO)用于有限缓冲区流水车间调度的研究;针对有限缓冲区流水线调度问题,谢展鹏等^[2]提出一种基于变邻域搜索策略的Memetic算法,并验证了所提算法的有效性。PAN等^[3]提出一种混合离散差分进化算法(HDDE),该算法采用多种邻域解的局部搜索增强了算法的搜索能力。胡蓉等^[4]采用一种混合差分进化算法求解加工时间随机分配的有限缓冲区流水线调度问题。QING等^[5]研究具有有限缓冲区的流水车间调度问题,提出一种基于嵌入差分进化算法的两阶段方法。张培文等^[6]提出一种混合人工蜂群算法,该算法与基于NEH的带权重的曲线拟合(WPFE)启发式算法进行结合,在解决有限缓冲区流水车间调

度问题上具有很好的效果。

随着精益生产方式在现代制造企业中的广泛应用,在车间整体生产运作过程中对工时、质量、成本等方面精准控制的标准不断提高,由于准备时间的存在增加了完工工时的不确定性,提高了编制生产计划的复杂度,增加了各生产单元配合协作的难度,因此,近年来带准备时间的排产问题的研究越来越受到了广泛关注。ZHANG等^[7]对带准备时间的流水车间调度问题进行了研究,并提出一种改进的蚁群算法(E-ACO)来解决该问题。SHEN等^[8]提出一种带有邻域函数和多样化结构的禁忌搜索算法,用来解决带准备时间的Job shop调度问题。TRAN等^[9]研究带准备时间的同质并行机调度问题,提出一种分支检验分解方法。钟涛等^[10]以最小化总延迟为优化目标,提出一种混合进化算法用于求解带准备时间的单机调度问题。BENKALAI等^[11]研究并行工位的置换流水车间排产优化问题,并考虑了准备时间的存在,提出了一种改进的候鸟算法解决该问题。PAN等^[12]设计三种局部搜索算法和三种基于种群的启发式方法对带准备时间的Job shop调度问题进行了求解。AN等^[13]研究带准备时间和有限等待时间约束的两机调度问题,并提出一种分支定界算法解决该问题。

通过对近年来相关研究文献的分析可以看出,目前对于有限缓冲区排产优化问题的研究主要集中在给定缓冲区容量下的生产车间排产优化问题,并侧重于对全局优化算法的研究。通过改进算法或是将其于不同的算法结合,使得算法在寻优方面更加精确,但是少有学者对不同类型的有限缓冲区的排产优化问题进行系统的研究,也未针对不同类型的缓冲区制定相应的局部调度规则。对于带准备时间的排产优化问题的研究则主要集中于单一属性变化对准备时间的影响,研究重点仍侧重于对优化算法的改进,而少有学者研究多种属性动态组合结果与准备时间的关系,也未进一步研究多种生产约束并存的情况下的带准备时间的排产优化问题。带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题较一般柔性流水车间排产优化问题更加复杂,其与以往研究工作的不同之处:在研究带准备时间的排产优化问题过程中,重点分析连续加工工件多种属性信息的动态变化对准备时间取值的影响;在研究多序列有限缓冲区排产问题过程中,不仅研究了缓冲区的容量受限所带来的生产阻塞问题,还探讨了工件进出多序列缓冲区时入道分配和出道选择的问题。柔性流水车间排产优化问题已被证明是NP-Hard问题^[14],因此,带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题也同样具有

NP-Hard 问题的特征。

随着研究问题的复杂化,应该进一步探索更有效率的优化方法,CGA 算法是由 HARIK 提出的一种分布估计算法^[15],该算法在计算量和进化速度方面具有极大的优势,但也存在搜索范围较小,易陷入局部极值的问题。当前学者主要从多种群和概率分布的方向进行研究来克服其不足之处^[16-17],单从这两种方式上不能明显的提高算法优化效果,还会损失 CGA 算法快速搜索的优势。为防止 CGA 进化算法的早熟,提高生成新个体的质量和多样性,从概率模型和概率模型生成新个体的过程进行研究,提出一种 ICGA 算法,通过高斯映射将原概率模型映射到新的概率模型,增强该算法进化活力和跳出局部极值能力,更好的解决带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题。

1 数学模型

1.1 问题描述

如图 1 所示,本文研究的排产优化问题可以描

图 1 带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化模型

1.2 模型参数

模型参数主要如下。

n : 加工的工件总数;

m : 加工的工序总数;

Bus_i 表示第 i 个工件, $i \in \{1, \dots, n\}$;

$Oper_j$ 表示第 j 个工序, $j \in \{1, \dots, m\}$;

M_j 表示工序 $Oper_j$ 中并行机的工位, $j \in \{1, \dots, m\}$;

$WS_{j,l}$ 表示工序 $Oper_j$ 的第 l 个工位, $j \in \{1, \dots, m\}$, $l \in \{1, \dots, M_j\}$;

Bu_j 表示工序 $Oper_j$ 的缓冲区, $j \in \{2, \dots, m\}$;

A_j 表示工序 $Oper_j$ 的缓冲区中等待加工队列的个数, $j \in \{2, \dots, m\}$;

$Bs_{j,a}$ 表示工序 $Oper_j$ 的缓冲区 Bu_j 中第 a 个序列缓冲区, $j \in \{2, \dots, m\}$, $a \in \{1, \dots, A_j\}$;

述为: n 个工件在车间顺序进行 m 道工序的加工, m 道工序中至少有一道工序包含多个并行工位,每道工序中工件需选择一个工位进行加工^[18]。工序间存在确定容量的缓冲区,完工工件进入缓冲区中等待进行下一道工序加工。若达到缓冲区的容量上限,则上一道工序完工工件停留在其加工工位上。此时,该工位被阻塞,无法加工其他工件,直到缓冲区有存放空间,工件移入缓冲区,该工位才被释放。在部分工序的有限缓冲区中,存在多个容量有限的等待序列,工件从序列的一侧进入,从另外一侧出队列。当等待序列达到容量限制时,也会出现工件被阻塞在上一道工序加工工位的情况。当工件从缓冲区进入加工工位时,如果工件与该加工工位前一个加工的工件的属性信息不一致,会导致在标准加工时间之外增加一个准备时间。已知工件在各工序上的标准加工时间,通过排产优化获得工件在生产过程中的上线顺序,及其在各工序的准备时间、开工时间和完工时间,求解更好满足排产优化目标的排产结果。

$K_{j,a}$ 表示工序 $Oper_j$ 的缓冲区 Bu_j 中序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 的工位, $j \in \{2, \dots, m\}$, $a \in \{1, \dots, A_j\}$;

$b_{j,a,k}$ 表示在缓冲区 Bu_j 的序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 中第 k 个缓冲区工位, $j \in \{2, \dots, m\}$, $a \in \{1, \dots, A_j\}$, $k \in \{1, \dots, K_{j,a}\}$;

$WA_{j,a}(t)$ 表示在 t 时刻,缓冲区 Bu_j 中第 a 个序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 中等待加工工件的队列, $j \in \{2, \dots, m\}$, $a \in \{1, \dots, A_j\}$;

$S_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 上的开工时刻;

$C_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 上的完工时刻;

$Tb_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 上的标准加工时间, $j \in \{1, \dots, m\}$;

$Te_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 进缓冲区 Bu_j 的时刻, $j \in \{2, \dots, m\}$;

$TL_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 出缓冲区 Bu_j 的时刻, $j \in \{2, \dots, m\}$;

$To_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 完成工序 $Oper_j$ 加工后, 移出其加工工位的时刻, $j \in \{1, \dots, m\}$;

$Tw_{i,j}$ 表示工件 Bus_i 在缓冲区 Bu_j 中等待的时间, $j \in \{2, \dots, m\}$;

$Ts_{i,j,l}$ 表示工件 Bus_i 选择在工位 $WS_{j,l}$ 上加工, 工位 $WS_{j,l}$ 的准备时间, $j \in \{2, \dots, m\}$;

$Nsrr_{x,i,i}^l$ 表示工位 $WS_{j,l}$ 上连续加工工件的属性变化关系, $i, i' \in \{1, \dots, n\}$ 且 $i \neq i'$ 。

在排产过程中对于标准有限缓冲区主要关注缓冲区的容量, 将其作为只包含一个等待队列的缓冲区, $A_j=1$; 多序列有限缓冲区中包含多个序列缓冲区, 同时, 每个等待加工队列又在一个序列缓冲区中, 所以等待加工队列的个数等于序列缓冲区的个数, $A_j \geq 2$ 。

1.3 约束条件

1.3.1 假设变量

$$At_{i,j,l} = \begin{cases} 1 & \text{工件 } Bus_i \text{ 在工序 } Oper_j \text{ 被} \\ & \text{分配到工位 } WS_{j,l} \text{ 上加工} \\ 0 & \text{工件 } Bus_i \text{ 在工序 } Oper_j \text{ 未被} \\ & \text{分配到工位 } WS_{j,l} \text{ 上加工} \end{cases} \quad (1)$$

$$OA_{i,j,a}(t) = \begin{cases} 1 & \text{在 } t \text{ 时刻, 工件 } Bus_i \text{ 在工序 } Oper_j \\ & \text{的等待加工队列 } WA_{j,a}(t) \text{ 中} \\ 0 & \text{在 } t \text{ 时刻, 工件 } Bus_i \text{ 不在工序 } Oper_j \\ & \text{的等待加工队列 } WA_{j,a}(t) \text{ 中} \end{cases} \quad (2)$$

$$QBC_{j,a}(t) = \begin{cases} 1 & \text{在 } t \text{ 时刻, 工序 } Oper_j \text{ 的序列缓冲区} \\ & Bs_{j,a} \text{ 中工件数 } card(WA_{j,a}(t)) > 0 \\ 0 & \text{在 } t \text{ 时刻, 工序 } Oper_j \text{ 的序列缓冲区} \\ & Bs_{j,a} \text{ 中工件数 } card(WA_{j,a}(t)) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

1.3.2 柔性流水车间排产的一般性约束

$$\sum_{l=1}^{M_j} At_{i,j,l} = 1 \quad (4)$$

$$C_{i,j} = S_{i,j} + Tb_{i,j}, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

$$C_{i,j-1} \leq S_{i,j}, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{2, 2, \dots, m\} \quad (6)$$

式(4)表示工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 上只能在一个工位上加工的约束, 式(5)表示工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 上的开工时间与完工时间之间的约束。式(6)表示工件 Bus_i 要进行下一道工序的生产加工过程之前, 必须先完成当前工序的生产加工。柔性流水车间的一般性约束对带准备时间的柔性流水车间多

序列有限缓冲区排产优化问题依旧成立。

1.3.3 有限缓冲区约束

$$To_{i,j} = \begin{cases} Te_{i,j+1} & i = \{1, \dots, m-1\} \\ C_{i,j} & i = m \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表示当工件在工序 ($Oper_j (i = \{1, \dots, m-1\})$) 时, 工件离开工位的时刻等于其进入下一道工序缓冲区的时刻, 当工件在工序 $Oper_m$ 时, 工件离开加工工位的时间等于完工时刻。

$$Te_{i,j} \geq C_{i,j-1}, j \in \{2, \dots, m\} \quad (8)$$

式(8)表示工件进入缓冲区的时间要大于等于工件在上一道工序的完工时刻, 如果有限缓冲区出现阻塞的情况, 工件在上一道工序加工完成后被滞留在加工工位上。

$$WA_{j,a}(t) = \{Bus_i | OA_{i,j,a}(t) = 1\} \quad (9)$$

式(9)表示在 t 时刻, 有限缓冲区的等待加工队列中包含的全部工件。

$$card(WA_{j,a}(t)) \leq K_{j,a} \quad (10)$$

式(10)表示, 在任意时刻, 等待加工队列 $WA_{j,a}$ 中包含的工件数要小于等于 $WA_{j,a}$ 所属的序列缓冲区的最大工位数 $K_{j,a}$ 。

1.3.4 多序列有限缓冲区约束

在有限缓冲区约束(8)、(10), 基础上增加两个新约束(11)、(12)

$$\sum_{a=1}^{A_j} \sum_{i=1}^n OA_{i,j,a}(t) \leq n \quad (11)$$

式(11)表示当 $A_j > 1$ 时, 在任意时刻, 多序列有限缓冲区的等待加工队列中等待加工的工件总数都要少于等于工件总数 n 。

$$\sum_{a=1}^{A_j} QBC_{j,a}(t) \leq n \quad (12)$$

式(12)表示当 $A_j > 1$ 时, 在任意时刻, 多序列有限缓冲区中等待加工工件中可进入工序 $Oper_j$ 的工位加工的工件总数都要少于等于工件总数 n 。

如果 $\exists i', i'' \in \{i | OA_{i,j,a}(t) = 1\}$, $Te_{i,j} \leq Te_{i',j}$, 则 $TL_{i,j}$ 和 $TL_{i',j}$ 满足下面关系

$$TL_{i,j} \leq TL_{i',j} \quad (13)$$

式(13)表示当 $A_j > 1$ 时, 对于第 a 个有限序列缓冲区中的工件, 要满足在上一道工序完工先进入缓冲区的等待加工队列的工件, 也要先出缓冲区。

1.3.5 带准备时间的约束

$$\left(\sum_{l=1}^{M_j} (Ts_{i,j,l} \cdot At_{i,j,l}) + C_{i,j-1} \right) \leq S_{i,j}, j \in \{2, \dots, m\} \quad (14)$$

式(14)对柔性流水车间基本约束式(6)的扩展,得到准备时间与开工时刻和完工时刻的关系,式(14)表明本工序开工时刻大于等于上一道工序完工时刻加上准备时间。

X 表示工件的属性信息的总数, $prop_{x,i}$ 表示工件 Bus_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) 的属性, $Prop_i = \{prop_{x,i}\}$ 表示工件 Bus_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) 的属性集合, 其中 $x \in \{1, \dots, X\}$ 。

$$Nsrv_{x,i,i'}^l = \begin{cases} 1 & prop_{x,i} \neq prop_{x,i'} \\ 0 & prop_{x,i} = prop_{x,i'} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)表示 Bus_i 和 $Bus_{i'}$ ($i, i' \in \{1, \dots, n\}$) 是工位 $WS_{j,l}$ 上两个连续加工的工件, $Nsrv_{x,i,i'}^l = 0$, 表示当两个工件示当两个工件的属性 $prop_{x,i}$ 和 $prop_{x,i'}$ 相同时, 工位加工后一个工件时不需要准备时间; $Nsrv_{x,i,i'}^l = 1$, 表示当两个工件的属性 $prop_{x,i}$ 和 $prop_{x,i'}$ 不同时, 工位加工后一个工件需要准备时间。

$$Ts_{i,j,l} = \sum_{x=1}^X Tsp_{j,x} \cdot Nsrv_{x,i,i'}^l, j \in \{2, \dots, m\} \quad (16)$$

式(16)中, $Tsp_{j,x}$ 表示在工序 $Oper_j$ 上连续加工的两个工件的某一个属性 $prop_{x,i}$ 改变时, 所需的准备时间。 $TSP_j = \{Tsp_{j,x}\}$ 表示在工序 $Oper_j$ 上连续加工的两个工件的属性改变时, 准备时间的集合, 其中 $x \in \{1, \dots, X\}$ 。 $Ts_{i,j,l}$ 表示当工件 Bus_i 在工序 $Oper_j$ 的工位 $WS_{j,l}$ 上加工且与该工位上前一个加工的工件有多个属性信息不同时, 所需的准备时间。

其他约束条件如下: 不可中断约束: 若工件在加工工位上已开工, 则不能中断, 直到完成在该工位的生产过程。 工位可用性约束: 排产任务中的工序包含的所有工位在生产时刻都是可使用的。 时间简化约束: 不考虑工件在序列缓冲区工位之间的转移时间, 工件在前后工序的加工工位之间的转移时间, 即在生成调度结果时只需要考虑工件在每个工序的加工时间和在工位上先后加工的工件属性改变时增加的准备时间。

1.4 排产结果评价指标

(1) 最大完工时间

$$C_{\max} = \max \{C_{i,m}\}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (17)$$

式(17)中 $C_{\max}$ 表示全部工件在最后一道工序加工完工时间中最大值, 也是全部工件完成加工的时间。

(2) 总工件等待加工时间

$$TWIP = \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^n (S_{ij} - C_{i,j-1}) \quad (18)$$

式(18)中工件等待时间是工件 Bus_i 在工序 $Oper_{j-1}$ 完工时刻 $C_{i,j-1}$ 到其下道工序 $Oper_j$ 开工时刻 S_{ij} 之间的等待时间, $TWIP$ 表示所有工件在完整的加工过程中的等待时间之和。 在有限缓冲区生产车间, 每个工件在每个工序间的等待时间等于工件在缓冲区的时间 $TW_{i,j} = Tl_{i,j} - Te_{i,j}$ 和工件在加工工位上的阻塞时间 $Te_{i,j} - C_{i,j-1}$ 与准备时间 $\sum_{l=1}^{M_j} (Ts_{i,j,l} \cdot At_{i,j,l})$ 之和。

(3) 总工位加工空闲时间

$$TWT = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} \left[\left(\max \{To_{i,j} \cdot At_{i,j,l}\} - \min \{S_{i,j} \cdot At_{i,j,l}\} \right) - \sum_{i=1}^n (Tb_{i,j} \cdot At_{i,j,l}) \right] \quad (19)$$

式(19)中工位加工空闲时间表示每个工位最早加工工件的开工时刻到最后加工工件离开该工位的时刻之间, 加工工位的空闲时间。 TWT 表示全部工位的加工空闲时间之和。

(4) 总负荷平衡代价

$$\overline{TB}_j = \left(\frac{\sum_{l=1}^{M_j} \sum_{i=1}^n (Tb_{i,j} \cdot At_{i,j,l})}{M_j} \right) \quad (20)$$

式(20)中 $\overline{TB}_j$ 表示在工序 $Oper_j$ 的 M_j 个并行机上平均加工时间。

$$TLB = \sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{l=1}^{M_j} \left[\sum_{i=1}^n (Tb_{i,j} \cdot At_{i,j,l}) - \overline{TB}_j \right]^2} \quad (21)$$

式(21)通过在工序 $Oper_j$ 的每一个工位 $WS_{j,l}$ 上的总加工时间与该工序的并行机平均加工时间 $\overline{TB}_j$ 的差值平方后再求和, 建立负荷平衡代价 TLB_j , 总负荷平衡代价 TLB 是全部工序的负荷平衡代价之和。

(5) 总设备利用率

$$FUR = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (Tb_{i,j})}{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} \left(\max \{To_{i,j} \cdot At_{i,j,l}\} - \min \{S_{i,j} \cdot At_{i,j,l}\} \right)} \quad (22)$$

式(22)中 FUR 表示的柔性流水车间中所有工位的总设备利用率, 是全部工位有效加工时间与工位被占用时间跨度之比, 这个时间跨度从工位开始加工第一个工件到最后一个工件完成加工并离开该工

位之间的时间跨度，是一个时间段。

(6) 总工位准备时间

$$TS = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} (Ts_{i,j,l} \cdot At_{i,j,l}) \quad (23)$$

式(23)中 TS 表示的柔性流水车间中所有工位的准备时间之和。

(7) 总工件阻塞时间

$$TPB = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^m (Te_{i,j} - C_{i,j-1}) \quad (24)$$

式(24)中 TPB 表示的柔性流水车间中所有工件在加工完成后，由于缓冲区已满，阻塞在加工工位的阻塞时间之和。

2 改进的紧致遗传算法

在标准紧致遗传算法(CGA)每代进化中，依据概率模型的概率分布产生新个体，再从中选择符合进化趋势的个体来更新概率模型中的分布概率。概率模型中的元素，即模型中的概率值代表了可行解的分布状况，在进化过程中不断累计的寻优信息会在概率模型的概率值中体现。正是由于 CGA 算法每代采用单一个体更新概率模型，并且每代进化生产的新个体也产生于概率模型，经过几代进化后，如果控制生成个体基因片段的概率模型中一列(或是一行)的概率值中有一个过大，则会导致在以后的进化过程中生成的新个体中相同位置的基因片段出现相似的基因，进而导致概率模型产生新个体的多样性下降，又由于从概率模型生成的个体反过来会更新概率模型，所以会更加增大概率模型中概率值。当概率模型中元素(概率值)都变 0 或是 1 的时候，CGA 算法就会终止进化过程。因此一旦进入局部极值，CGA 算法很难跳出局部极值，整体进化趋势呈现不可逆的状态，导致算法早熟收敛。所以单从扩大概率模型生产新个体的数量角度考虑，不能明显的提高算法优化效果，还会损失 CGA 算法快速搜索的优势。

为防止 CGA 进化算法的早熟，提高生成新个体的质量和多样性，应该从概率模型和概率模型生成新个体的过程进行研究。先判断概率模型中与生产新个体基因片段相关的一列(或是一行)中概率值的分布状况，再通过引入高斯映射来将原概率模型映射到一个新的概率模型中。在保持原概率模型中概率值分布关系不变的前提下，扩展可行解的搜索能力，从而扩展概率模型生成新个体的多样性。

2.1 建立并初始化概率模型

概率模型用于统计和记录算法每代进化后，个体中基因的分布情况。根据个体编码信息包含上线序和工位分配信息两个部分。建立 $n \times n$ 的矩阵 P^L 作为 CGA 算法的上线序概率模型来优化排产的上线序。概率模型中 1 至 n 行对应工件 Bus_1 至 Bus_n ，1 至 n 列对应个体的 1 至 n 位， $P_{i,s}^L$ 表示工件 Bus_i 在上线加工队列中位置 s 上出现的概率。

概率模型的初始化方式采用均匀分配方式，该方式直接设置各个位置上每个工件出现的概率均相等，其能为算法提供一个较为均衡的优化起点，采用均匀分配的方式初始化概率模型 P ，即 $\forall(i,s), P_{i,s}^L = 1/n$ ，有助于扩大算法可行解搜索范围；并受约束条件 $\forall(s), \sum_{i=1}^n P_{i,s}^L = 1$ 的限制。

2.2 增加高斯函数映射的 CGA 算法

在文献[19]中采用信息熵来评估概率模型中概率值的分布状态，这种方法对概率值分布状态不是非常敏感，本文采用求取概率模型中概率值标准差的方法，来评估原概率模型的概率分布，进而判断和评估出当前模型搜索可行解的能力。

通过判断原概率模型中概率值的分布状态的结果，再将原概率模型 P^L 映射到新的高斯概率模型 F^L ，然后根据高斯概率模型 F^L 产生问题的新可行解 I^L (新个体)，再通过新的可行解更新原概率模型 P^L 。通过扩展概率模型 P^L 选择新的可行解的能力，增强其搜索可行解的范围。

改进的紧致遗传算法包括 3 个模型，概率模型 P^L 、概率模型 F^L 和模型 σ^L ，概率模型中元素 $P_{i,s}^L$ 表示工件 Bus_i 在上线加工队列中位置 s 上出现的概率。

在高斯概率密度函数的参数 μ 和 σ 中，均值 μ 决定正态曲线的中心位置；标准差 σ 决定正态曲线的陡峭或扁平程度。

$$\mu_{i,s}^L = \begin{cases} \sum_{s'=1}^{s-1} P_{i,s'}^L + \frac{P_{i,s}^L}{2} & s > 1 \\ \frac{P_{i,s}^L}{2} & s = 1 \end{cases} \quad (25)$$

式中， $\mu_{i,s}^L$ 取第 L 代轮盘赌选择的概率模型 P^L 中概率值 $P_{i,s}^L$ 的中心值与前 $s-1$ 概率值之和。

σ_s^L 是第 L 代概率模型 P^L 中第 s 列元素 $P_{i,s}^L$ 的标准差，作为高斯概率函数的参数，参与映射过程。同时设置基于标准差的启动映射运算的阈值 σ^T 用以判断是否启动高斯概率函数将原概率模型映射到新模型中，当 $\sigma_s^L > \sigma^T$ 时，启动高斯概率函数的映射。

由于进化开始的时候 $P_{i,s}^L = 1/n$, 又由于 $\sum_{i=1}^n P_{i,s}^L = 1$, 建立概率模型中一系列的标准差 σ_s^L , 如式(26)所示, σ_s^L 初始值为 0。如果 σ_s^L 的值偏小, 高斯概率曲线将过于陡峭, 映射空间寻优空间过小, 所以增加标准差调整参数 ξ 到式(26)中, 得到式(27)。

$$\sigma_s^L = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{s=1}^n \left(P_{i,s}^L - \frac{1}{n} \right)^2} \quad (26)$$

$$\sigma_s^L = \xi \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{s=1}^n \left(P_{i,s}^L - \frac{1}{n} \right)^2} \quad (27)$$

$$\sigma_s^L = \frac{n \cdot \max \{P_{i,s}^L\}}{\sum_{i=1}^n P_{i,s}^L - \max \{P_{i,s}^L\}} \quad (28)$$

式(28)中标准差调整参数 ξ 满足约束条件: 当 $\max \{P_{i,s}^L\} = 1$ 或是 $\left(\sum_{i=1}^n P_{i,s}^L - \max \{P_{i,s}^L\} \right) = 0$ 时, $\xi = \sqrt{n}$ 。

$$f(x | \mu_{i,s}^L, \sigma_s^L) = \frac{1}{\sigma_s^L \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x - \mu_{i,s}^L)^2}{2\sigma_s^{L2}} \right) \quad (29)$$

式(29)是高斯概率函数, 其中 σ 越小, 曲线越陡峭; σ 越大, 曲线越扁平。随着 CGA 算法的进化, 概率模型中概率值分布性下降, σ 的值会变大(一个概率值占优, 其他概率值很小, 远离均值), 映射后扩展的选择范围也会变大。

将概率模型 P^L 中概率值 $P_{i,s}^L$ 代入式(26)得到通过高斯概率映射的新概率模型 P^L , 然后再次采用轮盘赌的方式根据新概率模型 P^L 选择工件被安排加工队列中位置, 从而产生更加多样性的新个体。然后在产生的新个体中, 选择优秀的个体, 再通过这个优秀的个体通过式(30)更新原概率模型 P^L 。

$$P_{i,s}^{L+1} = \left(1 - \frac{\beta}{n} \right) \cdot P_{i,s}^L + \frac{\beta}{n} \cdot St, St \begin{cases} 1 & \text{Gene}_s = i \\ 0 & \text{Gene}_s \neq i \end{cases} \quad (30)$$

式(30)中 St 是学习系数, n 是加工的工件总数, β 是学习速率的调整倍率。每一代选择优秀个体更新概率模型, 个体中基因值 Gene_s , 表示工件 Bus_i 加工上线队列中顺序位置。式(30)表示当基因值 Gene_s 是工件 Bus_i 时, 概率模型第 s 列中工件 Bus_i 对应的概率值 $P_{i,s}^L$ 加上学习系数 St , 进一步增大工件 Bus_i 被选中在加工上线队列中位置 s 上加工的概率, 该列中的其他概率值减去 $\frac{\beta}{n} \cdot P_{i,s}^L$ 。

2.3 新个体的解码和编码

根据概率模型生成 NP 个新个体, 每个新个体的

生成过程: 在 P^L 概率模型部分, 个体的第 1 位至第 n 位基因值是根据工件 Bus_i 在第 s 位上出现的概率为 $P_{i,s}^L$, 依次采用轮盘赌的方式选择工件编号, 即工件上线顺序。

在个体解码过程中, 个体的基因值解码为 n 个工件在第一道工序的上线加工顺序。工件在每道工序的一个工位上进行加工过程受到局部调度规则控制, 由于各道工序间存在有限缓冲区, 当工件进入缓冲区时, 局部调度规则采用最大序列缓冲区剩余容量优先规则(Max queue buffer capacity remaining, MQBCR); 当工件离开缓冲区, 进入加工工位时, 局部调度规则采用最小准备时间优先规则(Shortest setup time, SST)、最先空闲机器优先规则(First available machine, FAM)和最早进入排序集合的工件优先规则(First come first served, FCFS), 其中最小准备时间优先规则(SST)优先级最高。若下一道工序的工位都处于加工状态, 并且缓冲区已满, 则该工件被阻塞在当前加工工位上。在这种情况下, 该工位无法加工其他工件, 直到缓冲区有存放空间, 工件移入缓冲区, 该工位才被释放。同时记录下工件 Bus_i 在工序 Oper_j 的选择的加工工位, 该工位的准备时间 $T_{s,i,j}$, 加工开工时间 $S_{i,j}$ 和加工完工时间 $C_{i,j}$, 并记录进入缓冲区时间 $Te_{i,j}$ 、离开缓冲区时间 $Tl_{i,j}$ 等信息, 直到所有工件完成全部工序的加工。

2.3.1 工件进入缓冲区的过程

当工件在上一道工序加工完成进入缓冲区时, 根据有限缓冲区的特点分为两种类型, 对于标准有限缓冲区, 如果缓冲区存在空闲工位, 即 $\text{card}(\text{WA}_{j,a}(t)) < K_{j,a}$, 则工件直接进入缓冲区等待序列; 对于多序列有限缓冲区, 上一道工序加工完成的工件, 依据 MQBCR 规则, 进入下一道序列缓冲区的等待加工序列中。

当 $\exists C_{i,j-1}$ 且 $t = C_{i,j-1}$ 时,

$$\text{Mca}_{i,j}(t) = \left\{ Bs_{j,a} \left| \max \left\{ \left[K_{j,a} - \text{card}(\text{WA}_{j,a}(t)) \right] \left(K_{j,a} - \text{card}(\text{WA}_{j,a}(t)) > 0 \right) \right\} \right\}, j \in \{2, \dots, m\} \right. \quad (31)$$

式(31)中 $\text{Mca}_{i,j}(t)$ 表示完成上一道工序 Oper_{j-1} 加工的工件 Bus_i 能够进入的序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 的集合。每个序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 的最大工位数 $K_{j,a}$ 与该序列缓冲区中当前等待加工的工件数量 $\text{card}(\text{WA}_{j,a}(t))$ 之差是当前该序列缓冲区 $Bs_{j,a}$ 的剩余容量(空闲工位数)。当工件完成上一道工序的加工, 即 $t = C_{i,j-1}$ 时, 将进入剩余容量最大的序列缓冲区。当 $\text{card}(\text{Mca}_j(t)) = 0$ 时, 表示当前全部序列

缓冲区都没有剩余容量;当 $card(Mca_j(t)) > 1$ 时,表示可以进入多个序列缓冲区。

2.3.2 工件离开缓冲区的过程

当工件出缓冲区进入加工工位时,如果存在一个工位 $WS_{j,l}$ 空闲,多个工件在缓冲区中等待的情况,即标准有限缓冲区中待加工工件数 $card(WA_{j,a}(t)) > 1$,在多序列有限缓冲区中可选择的待加工工件数 $\sum_{a=1}^{A_j} QBC_{j,a}(t) > 1$,在工件指派工程中,首先依据 SST 规则选择其中准备时间最小的工件 $\{Bus_i | \min(Ts_{i,j,l})\}$ 进行加工。如果准备时间最小的工件数量大于 2,则依据 FIFO 规则选择这些工件中在缓冲区中等待时间最长的工件 $\{Bus_i | \max\{(t - Te_{i,j}) | i | OA_{i,j,a}(t) = 1\}\}$ 进行加工。如果存在多个工位空闲,一个工件等待的情况,即标准有限缓冲区中待加工工件数 $card(WA_{j,a}(t)) = 1$,在多序列有限缓冲区中可选择的待加工工件数 $\sum_{a=1}^{A_j} QBC_{j,a}(t) = 1$,在工位指派过程中,先依据 SST 规则选择准备时间最小的工位进行加工;如果可选工位大于 2,则根据 FAM 规则为工件安排工位,选择最先空闲的工位进行加工。多工位多工件的情况是上述两类的情况的组合。

2.4 ICGA 算法流程

(1) 根据最大熵原则,初始化概率模型 P^L 为:
 $\forall (i, s) P_{i,s}^L = 1/n$,同时初始化进化代数 $L = 0$ 。

以下步骤(2)~(5)为通过高斯概率映射到新的概率模型新个体产生过程。

(2) 采用轮盘赌的方法,依次根据概率模型 P^L 中各列概率值选择个体中基因采样值(依次为上线队列的每个位置安排要加工的工件),一旦某个工件被选中,该工件随后不再参与选择,未被选中的工件则继续参与选择,直到所有工件安排完毕,产生一个新个体,从而生成 NP 个临时新个体 $I'_1, I'_2, \dots, I'_{NP}$ 。

(3) 清空高斯概率映射列集合 FS^L ,计算原概率模型 P^L 中第 s 列的标准差 σ_s^L ,判断 σ_s^L 是否大于启动高斯概率映射的阈值 σ^T ,将符合映射条件的列 s' ,加入高斯概率映射列集合 FS^L 。

(4) 通过高斯概率映射列集合 FS^L 中列号对应的原概率模型 P^L 中列的概率值和临时新个体 I'_{NP} 中对应的基因值,计算出来均值 μ_s^L ,并存入高斯概率参数 μ 的集合 FU^L 中。

(5) 将原概率模型 P^L 属于集合 FS^L 中那列的概率值代入式(29),通过高斯概率函数建立新概率

模型 F^L 。再次采用轮盘赌的方式,依据新概率模型 F^L 中的概率值生成新的基因采样值,并用这个新值替换个体 I'_{NP} 中对应位置的基因值,从而生产新的个体 I_{NP} ,转到(4),直到所有个体处理完成。

(6) 对新生成的 NP 个新个体 I_{NP} 进行解码,并求出每新个体的适应度函数值。

(7) 根据适应度函数值选取优秀个体 I_{best} 引导概率模型 P^L 更新。更新操作根据式(30)进行,使原概率模型 P^L 在 I_{best} 引导的方向进化,更新操作如第 2.2 节所述,进化代数进行 $L = L + 1$ 处理。

(8) 判断更新后的原概率模型 P^{L+1} 是否收敛,即原概率模型 P^{L+1} 中所有概率值是否为 1 或 0,若符合收敛条件,则输出历史最优个体,结束进化过程,否则返回(2)继续执行。

3 仿真试验

算法程序采用 MATLAB 2016a 仿真软件编写,运行于 Window10 操作系统,处理器为 Core i5,CPU 为 1.70 GHz,内存为 6 GB 的 PC 机。带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题来源于客车制造企业的生产实践中,是一类复杂的排产问题,其排产结果具有很强的不确定性,目前缺乏标准算例。因此,本文在进行仿真试验时首先采用柔性流水车间调度问题(Flexible flow shop scheduling problem, FFSP)的标准数据对改进的紧致遗传算法中的参数进行探讨和分析,以确定最佳参数值,并通过多组大规模和小规模数据测试改进紧致遗传算法对标准紧致遗传算法寻优能力方面的提升效果。在此基础上,通过将多种群体智能算法与多个进出多序列缓冲区的局部指派规则进行组合,设计了 8 组对比仿真方案,并通过带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区的实例数据对 8 组仿真方案进行测试,进一步分析 ICGA 算法与局部指派规则相结合的方法对于解决此类问题的效果。

3.1 算法参数分析

算法的参数取值对算法的寻优性能有显著的影响。ICGA 算法中有 3 个关键参数:启动高斯映射运算的阈值 σ^T 、学习速率的调整倍率 β 、每一代生成的新个体数 NP 。选择 Carlier 和 Neron 提出的标准算例对各参数进行测试,以算例 j15c5d3 为例说明正交试验的过程。3 个参数各取 4 种水平(表 1)进行规模为 $L_{16}(4^3)$ 的正交试验(表 2)。算法在每组试验中分别运行 20 次,取其最大完工时间 C_{max} 的平均时间 C_{max} 与进化时间 T_{cpu} 的平均值 $\overline{T_{cpu}}$ 作为评价指标。

表 1 各参数水平

参数	水平			
	1	2	3	4
阈值 σ^T	5.0	10	15	20
调整倍率 β	1.0	1.5	2.0	2.5
新个体数 NP	2.0	3.0	4.0	5.0

表 2 正交试验及试验结果统计表

试验号	阈值 σ^T	调整倍率 β	新个体数 NP	平均时间	进化时间
				$C_{\max}$	T_{cpu}
1	1(5)	1(1.0)	1(2)	87.70	1.219
2	1(5)	2(1.5)	2(3)	87.00	0.598
3	1(5)	3(2.0)	3(4)	87.20	0.492
4	1(5)	4(2.5)	4(5)	87.30	0.406
5	2(10)	1(1.0)	2(3)	86.90	0.889
6	2(10)	2(1.5)	1(2)	87.00	0.735
7	2(10)	3(2.0)	4(5)	86.80	0.573
8	2(10)	4(2.5)	3(4)	87.80	0.426
9	3(15)	1(1.0)	3(4)	86.45	1.057
10	3(15)	2(1.5)	4(5)	87.35	0.687
11	3(15)	3(2.0)	1(2)	87.80	0.478
12	3(15)	4(2.5)	2(3)	87.70	0.353
13	4(20)	1(1.0)	4(5)	86.70	1.116
14	4(20)	2(1.5)	3(4)	86.60	0.596
15	4(20)	3(2.0)	2(3)	87.65	0.519
16	4(20)	4(2.5)	1(2)	88.45	0.338

表 3 各参数在各水平下正交试验的平均值

平均值	阈值 σ^T		调整倍率 β		新个体数 NP	
	$C_{\max}$	T_{cpu}	$C_{\max}$	T_{cpu}	$C_{\max}$	T_{cpu}
K1	87.30	0.679	86.94	1.070	87.74	0.693
K2	87.13	0.656	86.99	0.654	87.31	0.590
K3	87.32	0.644	87.36	0.516	87.01	0.643
K4	87.35	0.642	87.81	0.381	87.04	0.696

图 2(a1)表明当 σ^T 取值为 10 时, ICGA 算法得到最小的 $C_{\max}$ 值。当 σ^T 小于 10 时会过早的启动高斯映射破坏了 CGA 算法原有的进化过程使算法无法得到最好的 $C_{\max}$ 值。同样, 当 σ^T 大于 10 时会导致高斯映射启动得较晚达不到对 CGA 算法改进的目的。且如图 2(a2)所示, 随着 σ^T 的增加 T_{cpu} 逐渐减小, 这主要是因为 σ^T 越大高斯映射启动得越晚。因此, 设置 $\sigma^T=10$ 。

图 2 各参数对算法的性能影响趋势图

由图 2(b1)及图 2(b2)可见 β 的取值从 1 到 1.5 的变化过程中, $C_{\max}$ 基本无变化, 但 T_{cpu} 下降的幅度非常大。而当 β 的取值大于 1.5 以后, $C_{\max}$ 大幅上升, T_{cpu} 的下降幅度变小。这表明在 β 的取值为 1.5 之前, β 的变化对算法的优化效果基本没有影响, 但是随着 β 的增大会导致算法的平均进化时间大幅减小。在 β 的取值为 1.5 之后, 随着 β 的增加算法的平均进化时间逐渐减小, 但是算法的优化效果大大降低, 因此设置 $\beta = 1.5$ 。

如图 2(c1)可见 NP 的取值从 2 到 4 的变化过程中, $C_{\max}$ 的下降幅度非常大, 在 4 以后的阶段 $C_{\max}$ 趋于平稳状态。这表明在 NP 的取值为 4 之前, 随着 NP 值的增加, ICGA 算法的优化效果不断提升, 在 4 之后, NP 值的增加对 ICGA 算法的优化效果影响非常小。如图 2(c2)当 NP 为 3 时算法的平均进化时间最小。当 NP 小于 3 时随着 NP 的减小 T_{cpu} 逐渐变大。这主要是因为算法在每一代生成的新个体数量较少, 导致算法经过了更多代数的进化才停止。当 NP 大于 3 时随着 NP 的增加, T_{cpu} 也逐渐变大, 这主要是因为算法在每一代生成的新个体数量较多, 增加

了算法的计算量导致程序运行的时间成本增加。因此, 综合考虑算法的平均最大完工时间 $C_{\max}$ 和平均进化时间 T_{cpu} 的变化情况, 设置 $NP=4$ 。

3.2 ICGA 算法优化性能测试

通过 ICGA 算法、遗传算法(GA)、鲸鱼算法(WOA)以及标准的紧致遗传算法(CGA)在求解 FFSP 的小规模算例和大规模算例中的对比分析, 研究基于高斯概率模型映射的改进方法对于 CGA 算法寻优性能的影响。各算法在每组数据下分别运行 30 次, 将平均最大完工时间 $C_{\max}$ 作为主要评价指标, 设置 4 种算法的最大进化代数为 500 代。

3.2.1 小规模数据测试

测试数据来自于 Carlier 和 Neron 针对标准 FFSP 提出的 98 个标准算例, 该算例集分为了 5 种类型^[20]。NERSON 在文献[21]中利用分支定界法来求解该算例集, 并依据求解算例的难度将该算例集分成易解和难解两大类。为了更好地测试 ICGA 算法对于小规模数据的优化性能, 选取 4 组易解算例与 4 组难解算例共 8 组数据对 ICGA 算法进行测试。测试结果如下表所示。

表 4 小规模数据测试结果表

标准 算例	LB	GA		WOA		CGA		ICGA	
		$C_{\max}$	ARE	$C_{\max}$	ARE	$C_{\max}$	ARE	$C_{\max}$	ARE
j15c5a1	178	178	0	178	0	178	0	178	0
j15c5a2	165	165	0	165	0	165	0	165	0
j15c5b1	170	170	0	170	0	170	0	170	0
j15c5b2	152	152	0	152	0	152	0	152	0
j15c10c3	141	148.67	5.44%	151	7.09%	149.03	5.7%	145.37	3.1%
j15c10c4	124	133.1	7.34%	135.87	9.57%	133.63	7.77%	131.53	6.07%
j15c5d4	61	88.3	44.75%	89.24	46.3%	87.17	42.9%	84.15	37.95%
j15c5d5	67	84.53	26.16%	85.93	28.25%	82.93	23.78%	80.23	19.75%

表中 LB 表示 Carlier 和 Neron 算例的最大完工时间的下限(Lower Bound), 其最优值已在文献[22]中给出, ARE 表示此算法求得的解与最大完工时间的下限相比较的平均相对误差(Average relative error, ARE), 可以更好的分析比较各个算法的优化效果。其计算公式如式(32)所示, ARE 的值越小, 算法的性能越好。

$$ARE = \frac{C_{\max} - LB}{LB} \cdot 100\% \quad (32)$$

从表中的小规模数据测试结果可知, 对于易解算例 4 种算法都可以达到该算例的最大完工时间的下限。对于难解算例而言, GA 算法和 CGA 算法在前两组数据(j15c10c3、j15c10c4)下的平均最大完工时间 $C_{\max}$ 相差不多, 平均相对误差都较小, 优化效果较好。在后两组数据(j15c5d4、j15c5d5)下, CGA

算法的优化效果要略好于 GA 算法, 但是平均相对误差都比较大。与 GA 算法和 CGA 相比, WOA 算法在 4 组难解算例下的平均相对误差都更大, 优化效果偏差。ICGA 算法在 4 组难解算例下的平均相对误差都要比其他 3 种算法更小, 尤其是在最后两组数据(j15c5d4、j15c5d5)下的平均相对误差要明显小于其他 3 种算法。显然, 对于小规模数据的问题, ICGA 算法在寻优性能方面相对于 GA 算法、WOA 算法和 CGA 算法有更好的表现, 尤其对于小规模数据 d 类问题的优化效果要明显好于其他几种算法。这表明 ICGA 算法在解决小规模标准 FFSP 上具有较好的效果。

3.2.2 大规模数据测试

采用实例规模为 80 个工件 4 道工序、80 个工件 8 道工序以及 120 个工件 4 道工序的共 8 组数据,

来进一步测试 ICGA 算法在求解大规模复杂问题方面的优化性能。每一个算例中的每一道工序都设置为包含 3 台并行机, 测试结果如表 5 所示。

表 5 大规模数据测试结果表

实例编号	GA	WOA	CGA	ICGA
j80c4d1	1 464.63	1 485.73	1 441.53	1 415.63
j80c4d2	1 363.60	1 389.8	1 330.03	1 307.67
j80c8d1	1 825.70	1 843.23	1 799.17	1 774.07
j80c8d2	1 819.23	1 839.93	1 785.43	1 763.60
j120c4d1	2 136.53	2 141.93	2 112.43	2 094.47
j120c4d2	2 248.43	2 255.57	2 217.47	2 197.77
j120c4a1	2 513.63	2 533.08	2 480.33	2 458.23
j120c4a2	2 449.33	2 480.60	2 415.57	2 377.54

从表中的测试结果可以看出, ICGA 算法对于各组大规模数据的优化结果均小于其他 3 种算法。其中, 对于 j80c4d 类问题 ICGA 算法优化结果的平均值为 1 361.65, GA 算法为 1 414.12, WOA 为 1 437.77, CGA 算法为 1 385.78。对于 j80c8d 类问题 ICGA 算法优化结果的平均值为 1 768.84, GA 算法为 1 822.47, WOA 为 1 841.58, CGA 算法为 1 792.3。对于 j120c4d 类问题 ICGA 算法优化结果的平均值为 2 146.12, GA 算法为 2 192.48, WOA 为 2 198.75, CGA 算法为 2 164.95。对于 j120c8d 类问题 ICGA 算法优化结果的平均值为 2 417.89, GA 算法为 2 481.48, WOA 为 250.84, CGA 算法为 2 447.95。由以上分析得出, 对于处理大规模数据的优化问题, ICGA 算法的效果要好于 GA 算法、WOA 算法以及 CGA 算法。

在进行测试的过程中发现每种算法在大规模的数据下分别运行 30 次时每次得到的最大完工时间 $C_{\max}$ 相差较大, 有的算法甚至会落入到局部极值中造成较大的异常值的出现。为了更好地比较和评价各个算法对于大规模数据的优化效果, 这里以 j80c4d2 组数据为例将 4 种算法在 j80c4d2 组数据下运行 30 次所得到的适应度值结果绘制成箱形图如图 3 所示。

图 3 大规模数据下四种算法箱形图

箱形图(Box-plot)是一种用作显示一组数据离散程度的统计图, 通过箱形图可以体现出优化效果的稳定性, 在箱形图种采用四分位距(IQR)来衡量数据的离散程度

从图 3 中可以看出, 在 30 次的运行中 GA 算法产生了 2 个较大的异常值, 说明 GA 算法比较容易落入局部极值中。ICGA 算法产生的箱形图的位置最低, 说明 ICGA 算法产生的解的整体质量比其他 3 种算法更好。并且, ICGA 算法产生的箱形图的 IQR 要比其他 3 种算法产生的箱形图的 IQR 更小, 这说明 ICGA 算法产生的解的离散程度比其他 3 种算法更小, 其在大规模数据下排产结果的稳定性是 4 种算法中最好的。

通过以上方法采用大规模的数据分别对 4 种算法进行测试得出, 在解决标准 FFSP 上, ICGA 算法比其他 3 种算法具有更强的持续进化和跳出局部极值的能力, 通过高斯概率模型映射的改进方法能够扩展 CGA 算法进化过程中解的搜索范围, 在一定程度上克服了其早熟收敛的问题。

3.3 带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区实例测试

3.3.1 构建仿真数据

构建贴近客车制造企业的焊装车间和涂装车间的生产运作情况的仿真数据。

(1) 车间模型参数。某客车制造企业的焊装车间是由多条生产线构成的刚性流水车间, 可以将其简化为 1 个生产工序, 涂装车间中工序简化为 3 工序, 排产仿真数据共包含 4 个工序, 即 $\{Oper_1, Oper_2, Oper_3, Oper_4\}$, 4 个工序的并行工位数为 $\{M_j\}$ 为 $\{3, 2, 3, 2\}$ 。焊装车间和涂装车间之间缓冲区是多序列有限缓冲区, 所以将排产仿真数据中工序 $Oper_2$ 的缓冲区设置为多序列有限缓冲区。工序 $Oper_2$ 的缓冲区 Bu_2 中序列缓冲区个数 $A_2=2$, 其中序列缓冲区 $B_{s_{2,1}}$ 包含的工位数为 $K_{2,1}=2$, $B_{s_{2,2}}$ 包含的工位数为 $K_{2,2}=2$, 即, 多序列有限缓冲区中有 2 个序列缓冲区, 每个序列缓冲区中有 2 个停放待加工客车车体的工位。

在涂装车间的生产过程中工位先后加工两辆客车的车型和颜色属性的改变, 需要对工位进行清洁和生产设备调整等工作, 所以仿真过程将客车车型和颜色属性的改变作为计算准备时间的依据。在表 6 中设置工位先后加工的客车车型改变的准时间参数和先后加工的客车颜色改变时的准备时间参数。当客车从缓冲区进入下一道工序的加工工位时, 由式(16)来计算增加的工位准备时间。

表 6 模型参数表

模型参数	参数说明	参数值
有限缓冲区相关参数	A_2 工序 $Oper_2$ 的缓冲区 Bu_2 的序列缓冲区个数	2
	$K_{2,1}$ 序列缓冲区 $Bs_{2,1}$ 的容量	2
	$K_{2,2}$ 序列缓冲区 $Bs_{2,2}$ 的容量	2
	$K_{3,1}$ 工序 $Oper_3$ 有限的缓冲区 Bu_3 的容量	1
	$K_{4,1}$ 工序 $Oper_4$ 的有限缓冲区 Bu_4 的容量	1
准备时间相关参数	$Tsp_{2,1}$ 在工序 $Oper_2$ 并行工位上, 先后加工的客车车型改变时的准备时间参数	4
	$Tsp_{2,2}$ 在工序 $Oper_2$ 并行工位上, 先后加工的客车颜色改变时的准备时间参数	4
	$Tsp_{3,1}$ 在工序 $Oper_3$ 并行工位上, 先后加工的客车车型改变时的准备时间参数	5
	$Tsp_{3,2}$ 在工序 $Oper_3$ 并行工位上, 先后加工的客车颜色改变时的准备时间参数	5
	$Tsp_{4,1}$ 在工序 $Oper_4$ 并行工位上, 先后加工的客车车型改变时的准备时间参数	3
	$Tsp_{4,2}$ 在工序 $Oper_4$ 并行工位上, 先后加工的客车颜色改变时的准备时间参数	3

(2) 加工对象参数。客车属性信息的总数 $X = 2$, $Prop_1$ 表示客车的车型属性, $Prop_2$ 表示客车的颜色属性, 车型属性 $PropValue_1 = \{BusType_1, BusType_2, BusType_3\}$, 颜色属性 $PropValue_2 = \{BusColor_1, BusColor_2, BusColor_3\}$, 假设工序 $Oper_2$ 的加工工位 $WS_{2,1}$ 上两个连续加工的客车 Bus_3 , Bus_5 , 如果车型属性 $prop_{1,3} = BusType_2$, $prop_{1,5} = BusType_2$, 客车颜色属性 $prop_{2,3} = BusColor_3$, $prop_{2,5} = BusColor_1$, 则 $prop_{1,3} = prop_{1,5}$, $prop_{2,3} \neq prop_{2,5}$, 得到 $Nsrv_{2,3,5}^2 = 1$, 由式(16)计算出准备时间 $Ts_{5,2,2} = Tsp_{2,2} = 4$ 。

表 7 客车的车型和颜色属性信息表

客车属性	车型 $Prop_1$	颜色 $Prop_2$
Bus_1	$Type_1$	$Color_1$
Bus_2	$Type_2$	$Color_1$
Bus_3	$Type_3$	$Color_2$
Bus_4	$Type_2$	$Color_2$
Bus_5	$Type_1$	$Color_3$
Bus_6	$Type_3$	$Color_3$
Bus_7	$Type_1$	$Color_1$
Bus_8	$Type_2$	$Color_1$
Bus_9	$Type_3$	$Color_2$
Bus_{10}	$Type_1$	$Color_3$
Bus_{11}	$Type_2$	$Color_2$
Bus_{12}	$Type_3$	$Color_3$

表 8 客车生产的标准加工工时表

	$Oper_1$	$Oper_2$	$Oper_3$	$Oper_4$
Bus_2	8	30	34	42
Bus_2	11	38	38	36
Bus_3	15	28	44	26
Bus_4	19	25	42	24
Bus_5	10	26	52	34
Bus_6	16	36	40	30
Bus_7	12	20	46	28
Bus_8	21	24	48	32
Bus_9	22	22	35	38
Bus_{10}	13	32	36	40
Bus_{11}	20	35	45	44
Bus_{12}	14	34	50	22

3.3.2 仿真方案

通过将 ICGA 算法、GA 算法、WOA 算法以及标准的 CGA 算法作为全局优化算法, 并与多个进出多序列缓冲区的局部指派规则组合运用到求解上述某客车制造企业的排产优化问题中, 进一步分析 ICGA 算法与局部指派规则相结合的方法解决带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产问题的效果。共设计 8 组仿真方案, 仿真方案 1~4 的局部指派规则为先入先出规则(FIFO), 仿真方案 5~8 进入序列缓冲区采用最大序列缓冲区剩余容量优先规则(MQBCR), 出缓冲区时采用最小准备时间优先规则(SST)、最先空闲机器优先规则(FAM)以及最早进入排序集合的工件优先规则(FCFS)为局部指派规则, 其中 SST 规则优先级最高, 8 组仿真方案信息如表 9 所示。

表 9 8 组仿真方案信息

仿真方案	全局优化算法	局部指派规则
1	GA	FIFO
2	WOA	FIFO
3	CGA	FIFO
4	ICGA	FIFO
5	GA	MQBCR, SST, FAM, FCFS
6	WOA	MQBCR, SST, FAM, FCFS
7	CGA	MQBCR, SST, FAM, FCFS
8	ICGA	MQBCR, SST, FAM, FCFS

3.3.3 仿真结果与分析

3.3.3.1 排产结果评价指标

在优化过程中采用最大完工时间 $C_{\max}$ 作为全局优化算法的适应度函数值, 并同时建立与生产线实际应用相关的多项评价指标, 其中包括总工件等待加工时间 $TWIP$ 、总工位加工空闲时间 TWT 、总负荷平衡代价 TLB 、总设备利用率 FUR 、总工位准

备时间 TS 和总工件阻塞时间 TPB 。除总设备利用率 FUR 以外其他评价指标值都是越小越优^[23]。将 8

组仿真方案分别运行 20 次, 并将 20 次仿真结果的平均值放入表 10 中。

表 10 8 组方案排产结果的评价指标对照表

评价指标		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
$C_{\max}$	最优值	298	299	296	296	294	292	295	288
	最差值	305	310	304	302	302	302	300	296
	平均值	302.8	303.75	301.6	299.5	298.5	298.75	297.3	292.6
$TWIP$	最优值	686	650	680	644	656	617	644	627
	最差值	778	792	744	747	775	746	740	693
	平均值	719.5	711.85	708.55	700.5	711.3	680.15	689.65	660.75
TWT	最优值	296	291	282	279	267	244	229	225
	最差值	385	374	370	359	320	346	337	316
	平均值	346.65	325.7	322	311.15	300	269.7	286.1	256.65
TLB	最优值	43.75	41.04	44.16	41.57	40.82	28.09	26.28	28.84
	最差值	102.5	110.4	101.93	97.4	74.78	92.94	80.8	84.97
	平均值	66.38	63.55	64.38	63.43	55.33	53.82	53.73	53.26
FUR	最优值(%)	83.12	83.56	83.35	83.70	84.32	86.05	85.30	86.46
	最差值(%)	78.06	79.46	78.86	80.32	81.48	80.33	81.24	82.15
	平均值(%)	79.33	81.18	80.71	82.28	82.68	84.12	83.35	85.36
TS	最优值	137	131	125	120	131	113	117	110
	最差值	169	158	162	152	163	147	154	132
	平均值	149.05	139.05	142.4	132.3	139.65	129.05	133.8	122.4
TPB	最优值	102	90	92	86	93	82	81	74
	最差值	151	135	131	115	131	120	108	98
	平均值	124.85	112.7	108.8	99.75	108.4	99.1	95.75	87.95

从表 10 可以看出, 与局部指派规则为 FIFO 规则的方案 1~4 相比, 采用了 MQBCR 规则、SST 规则、FAM 规则以及 FCFS 规则的方案 5~8 的各个评价指标都得到了显著的优化。在采用同一种全局优化算法的前提下, 方案 5 比方案 1 的总工位加工空闲时间减少了 13.46%、总工位准备时间减少了 6.31%、总工件阻塞时间减少了 13.18%。方案 6 比方案 2 的总工位加工空闲时间减少了 17.19%、总工位准备时间减少了 9.09%、总工件阻塞时间减少了 12.07%。方案 7 比方案 3 的总工位加工空闲时间减少了 11.15%、总工位准备时间减少了 6.51%、总工件阻塞时间减少了 11.99%。方案 8 比方案 4 的总工位加工空闲时间减少了 20.73%、总工位准备时间减少了 8.80%、总工件阻塞时间减少了 15.14%。说明个体解码过程中采用 MQBCR 规则和 SST 规则, 并与优化算法结合, 能够更加充分利用多序列有限缓冲区容量, 显著减少总工位加工空闲时间、总工位准备时间和总工件阻塞时间, 从而更有效处理这类复杂的排产问题。

从表 10 中数据分析各优化算法的优化性能, 对比方案 1~4 或方案 5~8 可知, 在两种不同的局部指派规则下, ICGA 算法对于最大完工时间的优化效果都是 4 种算法中最好的。从表中可以看出, 采用 ICGA 算法的方案 4 和方案 8 的总工位加工空闲时间比采用 GA 算法的方案 1 和方案 5 分别减少了

10.24%与 14.45%, 比采用 WOA 算法的方案 2 和方案 6 分别减少了 4.47%与 4.84%, 比采用 CGA 算法的方案 3 和方案 7 分别减少了 3.37%与 10.29%。采用 ICGA 算法的方案 4 和方案 8 的总工位准备时间比采用 GA 算法的方案 1 和方案 5 分别减少了 11.24%与 12.35%, 比采用 WOA 算法的方案 2 和方案 6 分别减少了 4.85%与 5.15%, 比采用 CGA 算法的方案 3 和方案 7 分别减少了 7.09%与 8.52%。采用 ICGA 算法的方案 4 和方案 8 的总工件阻塞时间比采用 GA 算法的方案 1 和方案 5 分别减少了 20.10%与 18.87%, 比采用 WOA 算法的方案 2 和方案 6 分别减少了 11.49%与 11.25%, 比采用 CGA 算法的方案 3 和方案 7 分别减少了 8.32%与 8.15%。与采用其他 3 种算法的方案相比, 采用 ICGA 算法的方案 4 和方案 8 其他评价指标也都获得了不同程度的优化。上述结果说明当以最大完工时间作为优化目标时, 其他评价指标也同时获得了优化, 这也说明采用 ICGA 算法能够更好地减少工位准备时间, 更有效地降低有限缓冲区带来的阻塞影响, 更合理地安排工件进出序列缓冲区工位, 更有序地安排加工任务, 从而改善各项评价指标, 具有更好的寻优性能。

3.3.3.2 排产结果 Gantt 图分析

图 4 所示的方案 8 的排产结果的 Gantt 图。图中缓冲区中的浅灰色表示客车在缓冲区停留时间, 工位中的

浅灰色表示工位前后加工客车属性不同时产生的准备时间, 工位中的深灰色表示客车加工完成后, 滞留在工位上的阻塞时间。其中, 客车 Bus_3 所经过的加工路线为 $\{WS_{1,1}, b_{2,2,1}, b_{2,2,2}, WS_{2,2}, b_{3,1,1}, WS_{3,1}, b_{4,1,1}, WS_{4,1}\}$, 在图 4 中可以直观看出在 $t=44$ 时刻, 客车 Bus_3 完成工序 $Oper_1$ 的工位 $WS_{1,1}$ 上加工(客车 Bus_3 完工时间 $C_{3,1}=44$), $WA_{2,1}(t)=\{Bus_8, Bus_4\}$, $card(WA_{2,1}(t))=2$, $WA_{2,2}(t)=\{Bus_9\}$, $card(WA_{2,2}(t))=1$, 序列缓冲区

$BS_{2,1}$ 的容量 $K_{2,1}=2$, $card(WA_{2,1}(t)) \leq K_{2,1}$, 序列缓冲区 $BS_{2,2}$ 的容量 $K_{2,2}=2$, $card(WA_{2,2}(t)) \leq K_{2,2}$, 都满足有限缓冲区约束(10)。根据控制工件进入缓冲区的 MQBCR 规则, 通过式 (28) 得出 $Mca_{3,2}(t)=\{BS_{2,2}\}$, 客车 Bus_3 进入工序 $Oper_2$ 的序列缓冲区 $BS_{2,2}$ 的缓冲区工位 $b_{2,2,1}$, 排队等待进入工序 $Oper_2$ 加工, 客车进入缓冲区时间 $Te_{3,2}=C_{3,1}$, 也满足有限缓冲区约束(8)。

图 4 ICGA 算法排产结果 Gantt 图

在 $t=68$ 时刻, 客车 Bus_9 离开序列缓冲区 $BS_{2,2}$ 的缓冲区工位 $b_{2,2,2}$, 离开缓冲区时间 $Tl_{9,2}=68$, 同时在 $t=68$ 时刻, 客车 Bus_3 移动到 $BS_{2,2}$ 的缓冲区工位 $b_{2,2,2}$ 上等待进入工序 $Oper_2$ 加工工位。在 $t=98$ 时刻, $Tl_{3,2}=98$, 客车 Bus_3 也离开缓冲区, $Tl_{9,2} < Tl_{3,2}$, 满足多序列缓冲区约束(13)。从 Gantt 图中可以看出在使用序列缓冲区的过程中始终满足约束(12)。

进一步分析上述过程中客车 Bus_3 离开缓冲区过程, 当 $t=98$ 时刻, 工位 $WS_{2,2}$ 完成客车 Bus_9 的加工, 工位 $WS_{2,2}$ 空闲, 此时在序列缓冲区 $BS_{2,2}$ 的缓冲区

工位 $b_{2,1,2}$ 中客车 Bus_{12} 等待加工, 缓冲区工位 $b_{2,2,2}$ 中客车 Bus_3 等待加工, 根据表 7 中客车属性信息, 在工位 $WS_{2,2}$ 上, 如果选择加工客车 Bus_{12} , 准备时间 $Ts_{12,2,2}=Tsp_{2,2}=4$, 如果选择加工客车 Bus_3 , 准备时间 $Ts_{3,2,2}=0$, 根据控制工件离开缓冲区的 SST 规则, 选择客车 Bus_3 加工。

3.3.3.3 排产进化过程分析

如图 5 所示, GA 算法和 WOA 算法在进化初始阶段收敛得非常快, 主要得益于 CA 算法和 WOA 算法的初始种群规模($NP=30$)远大于 CGA 算法和

图 5 方案 5~8 适应度值与训练代数关系图

ICGA 算法($NP=4$),表现出对解空间较强的搜索能力,但是随着进化迭代次数增加,GA 算法和 WOA 算法早早地便落入了局部极值当中,并分别于第 121 代和第 87 代停止进化。CGA 算法具有快速搜索特性,但随着进化过程概率模型中概率值分布性快速下降,对解空间的搜索性能也下降,在 157 代停止进化,落入局部极值,ICGA 算法在初始阶段保持了跟 CGA 算法相似的快速搜索性能,当第 142 代出现进化停滞,概率模型分布性下降的时候,开始启动高斯分布映射运算,重新激活算法进化能力,进一步增强算法搜索解空间的能力,在 278 代搜索到最优解。

3.3.3.4 排产结果显著性统计分析

图 6 为方案 5~8 分别运行 10 次所得的最大完工时间 $C_{\max}$,从图 6 可以看出,方案 5 在 10 次训练中所得最大完工时间的平均值为 300,是

4 种方案中优化效果最差的。方案 6 虽然有时能够得到较优的结果,但是其在 10 次训练中所得到的结果不够稳定,波动幅度较大,有时容易落入局部极值中,其 10 次训练结果的平均值为 297.8。方案 7 的训练结果要好于方案 5 和方案 6,但要差于方案 8,其平均值为 295.3。方案 8 中第 8 次和第 10 次的训练结果为 290,是所有方案运行结果的最优值。方案 8 在 10 次训练中所得最大完工时间的平均值 291.6,是 4 种方案中优化效果最好的。且从图中曲线上下波动的幅度可以发现,与其他 3 种方案相比方案 8 在 10 次训练中所得到的最大完工时间变化幅度最小。这说明在求解带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题,方案 8 不仅优化效果比其他 3 种方案更好,且其排产结果的稳定性也是 4 种方案中最好的。

图 6 10 次实例测试的最大完工时间结果

4 结论

通过系统的分析研究某客车制造企业中带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题得到以下结论。

(1) 在该问题的全局优化方法研究方面,针对标准紧致遗传算法容易早熟收敛的问题,提出一种基于高斯映射的概率模型更新方式对其进行改进,改进的紧致遗传算法在保持了标准紧致遗传算法快速收敛特性的前提下,增强了算法进化的活力。采用多组大规模和小规模的算例测试了改进的紧致遗传算法的优化效果,并与其他群体智能算法进行了比较,结果表明提出的改进方法可以有效的提高紧致遗传算法的寻优性能。

(2) 在研究和分析了带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区的结构和特点的基础上,设计了多种启发式规则来指导局部指派过程,工件进入缓冲区时,以最大序列缓冲区剩余容量优先规则为最优先规则来控制工件在多个缓冲区的等待队列中的分配过程,当工件出缓冲区时,以最小准备时间优先规则为最优先规则来控制工位选择工件的过程,有效地降低了生产过程中的阻塞时间和准备时间对排产过程的影响。

(3) 采用实例数据测试了改进的紧致遗传算法与局部调度规则结合的方法对于解决带准备时间的柔性流水车间多序列有限缓冲区排产优化问题的效果,并设计了多组对比仿真方案,结果表明了本文所设计的方法在解决此类问题上的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] ZHAO F, TANG J, WANG J, et al. An improved particle swarm optimization with a linearly decreasing disturbance term for flow shop scheduling with limited buffers[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(5): 488-499.
- [2] 谢展鹏, 张超勇, 邵新宇, 等. 基于 Memetic 算法的有限缓冲区流水车间调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(5): 1254-1261.
- XIE Zhanpeng, ZHANG Chaoyong, SHAO Xinyu, et al. Flow shop scheduling with limited buffers based on Memetic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(5): 1254-1261.
- [3] PAN Q K, WANG L, GAO L, et al. An effective hybrid discrete differential evolution algorithm for flow shop scheduling with intermediate buffers[J]. *Information Sciences*, 2011, 181: 668-685.
- [4] 胡蓉, 钱斌. 一种求解随机有限缓冲区流水线调度的混合差分进化算法[J]. *自动化学报*, 2009, 35(12): 1580-1586.
- HU Rong, QIAN Bin. A hybrid differential evolution algorithm for stochastic flow shop scheduling with limited buffers[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(12): 1580-1586.
- [5] QING F, APPALYER S, KUNPENG L. Optimisation of flow-shop scheduling with batch processor and limited buffer[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(8): 2267-2285.
- [6] 张培文, 潘全科, 李俊青, 等. 有限缓冲区流水车间调度的混合人工蜂群算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(10): 2510-2511.
- ZHANG Peiwen, PAN Quanke, LI Junqing, et al. Hybrid artificial bee colony algorithms for flowshop scheduling problem with limited buffers[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(10): 2510-2511.
- [7] ZHANG S, WONG T N. Studying the impact of sequence-dependent set-up times in integrated process planning and scheduling with E-ACO heuristic[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(16): 4815-4838.
- [8] SHEN L, DSUZERE P, NEUFELD J S. Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 265(2): 503-516.
- [9] TRAN T T, ARAUJO A, BECH J C. Decomposition methods for the parallel machine scheduling problem with setups[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2016, 28(1): 83-95.
- [10] 钟涛, 萧卫, 徐宏云, 等. 带机器准备时间的单机调度问题的混合进化算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(11): 3249-3252.
- ZHONG Tao, XIAO Wei, XU Hongyun, et al. Hybrid evolutionary algorithm for solving single-machine scheduling problem with setup times[J]. *Application Research of Computer*, 2013, 30(11): 3249-3252.
- [11] BENKALAI I, REEBAIN D, GAGNE C, et al. Improving the migrating birds optimization metaheuristic for the permutation flow shop with sequence-dependent set-up times[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(20): 6145-6157.
- [12] PAN Q K, GAO L, LI X Y, et al. Effective metaheuristics for scheduling a hybrid flow shop with sequence-dependent setup times[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 303: 89-112.
- [13] AN Y J, KIM Y D, CHOI S W. Minimizing makespan in a two-machine flowshop with a limited waiting time constraint and sequence-dependent setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 71: 127-136.
- [14] LENSTRA J K, KAN A H G R, BRUCKER P. Complexity of machine scheduling problems[J]. *Studies in integer programming*, 1977, 1: 343-362.
- [15] HARIK G R, LOBO F G, GOLDBERG D E. The compact genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 287-297.
- [16] DAS R R, ERIG L C R, LOPES H S. Template matching in digital images using a compact genetic algorithm with elitism and mutation[J]. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 2010, 19(1): 91-106.
- [17] 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车间组批排产优化问题研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(6): 1617-1624.
- HAN Zhonghua, ZHU Yihang, SHI Haibo, 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): 1617-1624.
- [18] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 12-23.
- LI Congbo, ZHEN Huan, LI Lingling, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 12-23.
- [19] 赵兴旺, 梁吉业. 一种基于信息熵的混合数据属性加权聚类算法[J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(5): 1019-1027.
- ZHAO Xingwang, LING Jiye. An Attribute Weighted Clustering Algorithm for Mixed Data Based on

- Information Entropy[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(5): 1019-1027.
- [20] ALAYKYRAN K, ENGIN O, DOYEN A. Using ant colony optimization to solve hybrid flow shop scheduling problems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(5-6): 541-550.
- [21] NERSON E, BAPTISTE P, GUPTA J N D. Solving hybrid flow shop problem using energetic reasoning and global operations[J]. Omega, 2001, 29(6): 501-511.
- [22] SANTOS D L, HUNSUCKER J L, DEAL D E. Global lower bounds for flow shop with multiple processors[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 80(1): 112-120.
- [23] 徐华, 张庭. 混合离散蝙蝠算法求解多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 201-211.
- XU Hua, ZHANG Ting. Hybrid discrete bat algorithm for solving the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 201-211.
-
- 作者简介: 韩忠华, 男, 1977 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为生产与运作管理、企业自动化系统集成技术、车间排产与生产调度算法的工程应用。
E-mail: hanzhonghua@sia.cn
- 张权(通信作者), 男, 1994 年出生, 硕士。主要研究方向为车间排产与生产调度算法的工程应用。
E-mail: zhangq0716@163.com
- 史海波, 男, 1966 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为生产与运作管理、企业自动化系统集成技术、车间排产与生产调度算法的工程应用。
E-mail: hbshi@sia.cn

~~~~~

(上接第 235 页)

- LI Geqiang, ZHANG Longfei, HAN Weifeng, et al. Pulsation characteristic analysis and tooth profile design of double-circular-arc helical gear pumps[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(2): 186-192.
- [23] 孙浩林. 基于圆弧齿形的低脉动齿轮泵特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- SUN Haolin. Research on low-pulse external gear pump based on circular-arc gear profile[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [24] DEVENDRAN R S, VACCA A. A novel design concept for variable delivery flow external gear pumps and motors[J]. International Journal of Fluid Power, 2014, 15(3): 121-137.
- [25] VACCA A, DEVENDRAN R S. A flow control system for a novel concept of variable delivery external gear pump[C]//10th International Fluid Power Conference-Dresden. 2016: 263-274.
- [26] 杨德贵, 钟定莲. 径向移动变量齿轮泵(马达): 中国, 85109203[P]. 1987-06-03.
- YANG Degui, ZHONG Dinglian. Radial-movable variable displacement gear pump (Motor): China, 85109203[P]. 1987-06-03.
- [27] WINMILL L. Adjustable-displacement gear pump: U.S., 09/734, 326[P]. 2001-09-27.
- [28] 闻德生, 商旭东, 潘为圆, 等. 齿轮型多泵多马达传动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 399-406.
- WEN Desheng, SHANG Xudong, PAN Weiyuan, et al. Design and experiment on gear multi-pump and multi-motor driving system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 399-406.
-
- 作者简介: 赵斌, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要从事机电装备建模理论及智能控制、电液节能系统、液压元件等方面的研究。
E-mail: zbtyut@126.com
- 权龙(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服及比例控制技术, 工程机械节能。
E-mail: quanlong@tyut.edu.cn