DOI: 10.3901/JME.2020.02.220

周期式退火炉作批处理机的可重入批离散机流水车间调度

顾 涛 李苏建 林莹璐 吴秀丽
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 针对无缝钢管冷拔生产中的周期式退火炉作批处理机的可重入批离散机流水车间调度问题, 建立以总工件完工时间与批处理机总能源消耗最小化的双目标优化调度模型, 设计包括多目标粒子群算法、快速非支配等级排序、拥挤度比较以及变异进化操作的多目标粒子群算法, 该算法采用非支配等级排序与拥挤度比较进行最优粒子的选择策略和算法前期与后期变异相结合使用策略。试验结果表明, 与带变异进化操作的多目标粒子群算法和非支配排序粒子群算法相比, 该算法在两个目标函数上都找到更优的最小值, 其结果平均水平更靠近 Pareto 解集的前沿, 有效提高了算法的优化求解能力。通过 Pareto 解的方式该算法可得到一组综合权衡了完工时间和退火炉能源消耗两个指标的 Pareto 解集, 能提供多种可选的调度方案, 当生产时间充足, 可尽量选取退火炉能源消耗较低的方案, 当企业订单繁多追求生产效率时, 可尽量选取完工时间较小的方案, 有效地解决了此类实际问题。

关键词: 无缝钢管; 冷拔; 生产计划; 可重入生产; 周期式退火炉; Pareto

中图分类号: TG156

Research on the Re-entrant Batch Discrete Flow Shop Scheduling for Periodic Annealing Furnace as Batch Processor

GU Tao LI Sujian LIN Yinglu WU Xiuli

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology,
Beijing 100083)

Abstract: Aiming at the flow shop scheduling problem of reentrant batch discrete machines with periodic annealing furnace as batch processor in seamless steel tube cold drawing production, a bi-objective optimal scheduling model is established, which minimizes the total work completion time and the total energy consumption of batch machines. A multi-objective particle swarm optimization algorithm, fast non-dominant ranking, congestion comparison and particle mutation operation algorithm are designed. In this algorithm, non-dominant ranking and congestion comparison are used to select the optimal particle and the combination of early and late mutation is used. The experimental results show that, compared with the Variation- Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithms and Non-Dominated Sorting Particle Swarm Optimization algorithms, the algorithm finds a better minimum on both objective functions, and the average level of the results is closer to the front of Pareto solution set, which effectively improves the optimization ability of the algorithm. Through Pareto solution, the algorithm can get a set of Pareto solution which comprehensively weighs the completion time and energy consumption of annealing furnace. It can provide a variety of alternative scheduling schemes. When the production time is sufficient, the scheme with lower energy consumption of annealing furnace can be selected as far as possible. When the enterprise has many orders to pursue production efficiency, the scheme with smaller completion time can be selected as far as possible to effectively solve the problem. Such practical problems have been solved.

Key words: seamless steel tube; cold-drawing; production scheduling; re-entrant lines; periodic annealing furnace; Pareto

0 前言

考虑到在实际生产过程中工件在部分阶段的加

工工艺路径为循环的技术要求, 可重入的概念被提出并被引入到流水线调度问题^[1], 称为可重入混合流水车间调度问题(Re-entrant hybrid flow shop, RHFS)。在 RHFS 问题中, 结合混合流水车间和可重入的特性, 工件的加工顺序是确定的, 也就是说

需要访问的工作站是有一定的顺序的, 且需要多次重复此顺序以完成整个加工流程, 同时至少有一个工作站是有多台机器^[2]。

近年来, RHFS 调度问题引起了许多国内外学者关注。WATANAKICH^[3]在 2001 年研究了考虑机器安装时间的两阶段混合流水车间调度问题, 并用启发式算法求解; CHOI 等^[4]2008 年研究了一种基于整合涂装工艺的两阶段 RHFS 问题。DUGARDIN 等^[5]在 2009 年针对两阶段的 RHFS 多目标问题提出了 L-NSGA 和 SPEA-II 算法, 并在 2010 年以最大化瓶颈利用率和最小化最大完工时间为目标^[6], 提出了一种新的多目标遗传算法 L-NSGA 来求解 RHFS 调度问题; HEKMATFAR 等^[2]在 2011 年针对两阶段的 RHFS 调度问题, 提出了以最小化最大完工时间为目标的混合遗传算法; 周炳海等^[7]以最小化加权完成时间为调度目标, 提出了基于松弛机器能力约束的拉格朗日松弛算法; CHALARDKID 等^[8]将可重入混合流水车间调度问题, 用于洗涤和热处理工艺的两阶段中, 从理论上将热处理炉的利用率提高到 100%。还有一些学者研究 RHFS 调度问题的通用解决方法, KIM^[9]在 2005 年研究了多阶段的 RHFS 调度问题, 并使用启发式方法解决了具有多种批量的订单问题, 目标函数为最小化多个订单总的完成时间。JIANG 等^[10]对于 RHFS 调度问题, 使用了拉格朗日松弛算法, 但简化了求解问题, 并没有给出求下界的具体方法; CHO 等^[11]针对 RHFS 调度问题, 提出了基于局部搜索的 Pareto 遗传算法, 基于 Minkowski 距离的交叉算子, 以寻求最小化完工时间和总拖延期的 Pareto 最优解; ZHOU 等^[12]在 2016 年提出混合差分演化算法用于解决 RHFS 问题。

批处理机调度问题是由 IKURA^[13]最早提出, 不同于经典车间调度的工件加工具有排他性, 批处理机调度中多个工件可以同时在一台机器上加工。BRUCKER 等^[14]在其研究中, 提到根据机器环境的不同, 将批处理机调度模型分为三类, 即固定的批处理机模型、串行的批处理机模型和并行的批处理机模型。轩华^[15]在研究中将串行批处理机与流水车间调度结合, 进行了含串行批处理机的三阶段混合流水车间调度问题研究; 赵玉芳等^[16]针对钢铁行业加热炉对管坯的加热过程提出了一种连续性批处理机调度模型。

综上所述, 在可重入车间的调度问题研究中, 已经涌现一些调度方法, 但由于可重入车间调度问题的高度复杂性, 这些调度都是基于对该问题简化的基础上建立相关模型来求解的。在无缝钢管冷拔

生产中, 常常采用周期式退火炉, 需要将若干加工单元的工件同时装入退火炉, 否则将增加较大的生产成本, 因此, 该生产设备可以作为批处理机。综上, 解决本文提出的并行批处理机的可重入车间调度问题 (Parallel batch processing-reentrant hybrid flow shop scheduling problem, PB-RHFS), 对于无缝钢管冷拔生产车间调度问题具有一定的理论与应用价值。

1 问题描述

1.1 生产线与加工单元设定

1.1.1 生产线描述

无缝钢管冷拔生产的工序较多, 本文针对无缝钢管的冷拔工段, 直接把热处理产品作为输入, 把精整段产品直接作为输出, 如图 1 的无缝钢管冷拔生产工艺流程图所示。

图 1 冷拔生产线示意图

在冷拔生产线中, 冷拔工艺是该工段的瓶颈工序, 因为一般的工艺水平还需要以根为单位进行拔制, 且需要的加工时间也比较长, 所以一般在无缝钢管生产线上冷拔机器至少有三台, 有的生产线能够达到 9 台机器甚至更多。冷拔工段存在多道次重入的原因, 也是因为冷拔每道次的减壁量少, 且在进行下一次冷拔之前, 要重复其他相关的工序以及辅助工序。

冷拔加工时由于加工时温度低, 加工过程会产生一定程度的加工硬化。为消除这种加工硬化, 所以需要增加中间退火工序; 钢管在酸溶液中进行处理以除去外表面上的氧化铁皮(即日常描述的铁锈)的过程, 称为酸洗; 钢管在冷状态下拔制时, 拔制工具与钢管表面发生摩擦, 从而导致如降低冷拔生产率、钢管表面出现划痕等, 所以需要加入润滑工序。

1.1.2 加工单元设定

通过对冷拔生产线的描述, 可见在无缝钢管冷拔工段生产的过程中, 最小的加工单位是“根”, 但考虑到实际生产中的搬运、准备等环节, 无法实现以“根”为单位的即时加工即时搬运。并且, 某些工序也不可能一根一根地进行加工, 对于人工成本的消耗过高, 如酸洗等。“钢管加工单元”的概念是在无缝钢管冷拔生产的调度问题中, 当工件(以根为

单位的钢管)同时满足以下条件时,可以定义为一个“钢管加工单元”。

(1) 一个加工单元的钢管根数不超过生产线上任何一台加工机器的阈值。

(2) 钢管的基本规格相同。

(3) 钢管的加工工艺路径相同。

(4) 钢管的各工序的加工参数相同,比如加工时间等。即,保证加工同一批内的钢管时,机器不做任何调整。

(5) 钢管的订单交货期相同或相近。

当将同时符合以上条件的 x 根钢管归于一个加工单元后,就可将其简单地看作是一个 x 倍规格的工件。本文不讨论如何设置每批的根数效果最好,进入冷拔工段之前,所有钢管已经成批。进行调度时,为了有效优化复杂的模型,借鉴经典车间调度问题的优化建模思路,本文设定三个规则。

(1) 同一钢管加工单元内的钢管不作排序,内部钢管无差别。

(2) 一个加工单元有 x 根钢管,将其看作是一个 x 倍规格的工件,其加工时间为 x 根加工时间之和。

(3) 每个钢管加工单元在各个工序加工时的准

备时间、搬运时间以及辅助时间等都计入该工序的加工时间中。

按照加工单元规则形成的 m 个加工单元的待加工冷拔无缝钢管,在进行生产计划安排时,需要对其进行排序及机器选择。即,可理论描述为 m 个工件,4 个工序的可重入生产系统。如图 2 所示。

图2 简化为 RHFS 的冷拔生产线示意图

1.2 RHFS 问题

RHFS 问题描述: m 个工件,经过 n 个工序。每个工件完成前 n 个工序的加工后,需要重入此加工系统 $(l-1)$ 次,即共有 l 个道次,不同工件的道次允许不同(即 l 值不同)。每个工件每个道次要经过 n 个工序,也就是说每个工件有 $(l \cdot n)$ 个工序。 n 个工序对应 n 个机器集合,每个集合中包含至少一台加工机器,至少有一个工序的机器集合有两台或两台以上的并行机。无论哪个道次,工件到达某个工序之后,选择该工序的机器集合中空闲的一台机器进行加工,如图 3 所示。

图3 RHFS 问题示意图

可见,简化后的冷拔生产线与经典 RHFS 问题相吻合。

1.3 PB-RHFS 问题

在无缝钢管的实际生产中,小规模无缝钢管生产厂会使用成本、能源消耗比较小的周期式退火炉(也称间歇式退火炉)。周期式退火炉有使用灵活、操作简单、节约能耗的优点。这种使用周期式退火炉进行批量退火的工序,可看作批处理机。在该退火炉上进行钢管的批处理,属于并行的批处理机调度问题。批的退火时间等于该批中需要保温最久的工件的时间;退火工序是使钢管恢复塑性的过程,要求温差在一定范围,并有最短保温时长的要求。

一般退火时长适量增加不会对钢管的软化或再结晶起到决定性的影响,故钢管的退火批处理是要至少保证满足该批中所有钢管都能达到退火要求的最短处理时间。

周期式退火炉的能源消耗与炉体装载量、炉体保温材料等很多因素相关,且其能源消耗包含钢管加热所需热量、装料架和内胆等的加热所需热量,保温所需热量以及冷却散热时的功率等等,这些数值都需要根据实际的问题进行复杂的计算,甚至由于退火过程复杂并不能够很明确地划分出来。加之,本文侧重于研究车间调度部分,暂时不对退火炉的具体能耗做深入的探究,将退

火炉运行一次需要的能源简单分为两部分: 一部分是机器运行时炉体本身需要消耗的能源, 包含内胆、炉盖和装料架等的加热, 取决于要求加热的温度, 表现在单位时间的功耗, 并与保温时间相关; 另一部分与退火时的装载钢管量有关, 随着装载量的增大, 需要的加热、散热能耗也会相应地增多, 为便于研究本着定性不定量的原则将这一关系假设为线性相关, 同时也表现在单位时间的功耗, 与时间相关。

一般随着每批的数量增大, 退火炉需要开机的次数会减少, 从而退火工序所使用的能源消耗总量会减少, 但与此同时, 工件的等待时间会增加导致总的完工时间会变大, 所以减少退火炉的能源消耗和极小化总的完工时间是相悖的。一方面, 若考虑减少加热炉的开机次数, 即尽可能地增加批中钢管的数量, 等待尽可能多的钢管进入批中, 再运行退火炉, 这样则会使得中间库存大幅增大, 引起其余工序的机器空闲从而降低机器利用率, 生产效率降低; 另一方面, 若考虑尽可能地减小最大完工时间, 即减少钢管在各个工序前的等待时间, 一旦有钢管到达某个工序就尽快进行加工, 这样会使得退火炉在加工时不能具备合适的装载率, 造成能源消耗的不充分利用即是浪费。由此看来, 在不同的加工要求以及实际情况, 解决面向无缝钢管冷拔生产的存在批处理机的可重入车间调度问题时要对两个相悖的目标进行适当的选择与权衡。

2 优化调度模型建立

2.1 假设条件

相比 RHFS 标准问题, 建立调度模型时需通过排除一些特殊情况来使模型更加普适, 而 PB-RHFS 问题本身具有特殊性, 故在标准问题的假设条件基础上修改得到基本假设, 并依据并行的批处理调度提出针对 PB-RHFS 问题的假设。基本假设中所提工序非批处理工序, 所提机器为离散机, 假设如下。

2.1.1 基本假设

在零时刻, 所有工件都可被加工。

(1) 机器在任意时刻都可使用, 且没有故障和维修延迟。

(2) 工件之间是相互独立的, 不同工件的工序之间没有先后约束。

(3) 任何工件只有完成前一工序, 才能进入后一个工序; 任何工件只有完成前一道次, 才能进入后

一个道次。

(4) 工件的每个工序只能在某一时刻被一台机器加工, 且不允许抢占, 即一旦开始加工某工序, 不能停止加工其他工序。

(5) 每个工件在工序之间的转移过程时间和机器对于每个工件的加工准备时间都已经计入该工件的加工时间中。

(6) 每台非批处理机在同一时刻只能加工一个工件, 只有前一工件加工完毕, 才能加工后一个工件。

2.1.2 PB-RHFS 批处理假设

(1) 批处理机的容量已知。

(2) 批处理机同一时刻可加工多个工件, 将同时加工的这些工件称为一批, 同批的工件同时开始加工, 同时离开机器, 具有相同的处理时间。

(3) 同一批的工件加工时间为该批中所需处理时间最长的工件的加工时长。

(4) 批处理机运行时自身的能源消耗固定不变且事先已知, 仅与机器的运行时间相关。

(5) 批处理机运行时加热能耗与机器的装载量线性相关, 相关系数已知。

(6) 除批处理机外的其他加工部分的总能源消耗只与处理的总工件数相关, 故该生产系统的总能耗的变化只与批处理机的能耗相关。

(7) 批处理不改变原有工件加工顺序, 批内工件不做内部排序, 加工完成后按照之前顺序继续下一工序。

2.2 符号定义

模型用到的符号及其含义见表 1。

2.3 数学模型

基于假设条件, 对 PB-RHFS 问题构建数学模型描述如下。

目标函数

$$F = \text{Min}(F_1, F_2) \quad (1)$$

$$F_1 = \sum_{b=1}^B Q_b = \sum_{b=1}^B P_e \cdot T_b + \frac{B_b}{A} \cdot P_s \cdot T_b = \sum_{b=1}^B P_e + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{g_i=1}^{I_i} Y_{ig_i,b}}{A} \cdot P_s \cdot \max_{ig_i \in I_b} (T_{ijg_i,k}) \quad (2)$$

$$F_2 = \max(C_{ijg_i,k}) \quad (3)$$

优化调度模型的目标函数为批处理机的总能源消耗最小和总的完工时间最小。两个目标函数呈负相关, 且都是越小越优, 在寻优过程中, 如何权衡两个目标函数值是该问题的关键所在。

表 1 符号及含义

符号	含义	符号	含义
m	工件总数量, $i=1,2,\dots,m$	B_b	在批处理机上加工的第 b 批的工件总数
n	每道次的总工序数, $j=1,2,\dots,n$	I_b	在批处理机上加工的第 b 批的工件集合
I_i	工件 i 的总道次数	b_h	批处理机上加工的第 b 批中的第 h 个工件, $h=1,2,\dots,B_b$, $b_h \in I_b$
g_i	工件 i 所在的道次, 其中 $g_i=1$ 为第一层, $g_i=2,3,\dots,I_i$ 为重入层	T_b	批处理机上加工的第 b 批的加工时间
ig_i	在 g 道次的工件 i	S_b	批处理机上加工的第 b 批的开始加工时刻
M_j	工序 j 的机器集合, $k=1,2,\dots,M_j$	C_b	批处理机上加工的第 b 批的完工时刻
N_{jk}	工序 j 的机器集合中 k 机器加工的工件总数	Q_b	批处理机上加工第 b 批所需要消耗的能源总量
r_{jk}	工序 j 的机器集合中 k 机器加工的第 r 个工件, $r_{jk}=1,2,\dots,N_{jk}$	P_e	批处理机运行时炉体本身的单位时间能源消耗
T_{ijg_i}	工件 i 在 g 道次的第 j 工序的机器 k 上的加工时间	P_s	批处理机装载量达机器最大容量时, 加工其装载物所需的单位时间能源消耗, 在其之前使用相关系数 $1/A$ 使得该部分总值与装载量相关
$S_{ijg,k}$	工件 i 在 g 道次的第 j 工序的机器 k 上加工的开始时刻	bj	批处理机所处的工序, $bj \in n$
$C_{ijg,k}$	工件 i 在 g 道次的第 j 工序的机器 k 上加工的完工时刻	A	批处理机的最大容量
$X_{ijg,k}$	决策变量, 工件 i 在 g 道次的第 j 工序在机器 k 上进行加工, $X_{ijg,k}=1$, 否则, $X_{ijg,k}=0$	$Y_{ig,b}$	决策变量, 工件 i 在 g 道次上的批处理工序被分配到第 b 批加工, 则 $Y_{ig,b}=1$, 否则, $Y_{ig,b}=0$
B	在批处理机上加工的总批数, $b=1,2,\dots,B$		

分配约束

$$\sum_{k=1}^{M_j} X_{ijg,k} = 1 \quad \forall i, \forall j, \forall g_i, k \in M_j \quad (4)$$

$$\sum_{b=1}^B Y_{ig,b} = 1 \quad \forall i, \forall g_i \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{M_j} N_{jk} = \sum_{i=1}^m I_i \quad \forall i, \forall j, k \in M_j \quad (6)$$

$$\sum_{b=1}^B B_b = \sum_{i=1}^m I_i \quad \forall i, \forall b \quad (7)$$

$$B_b = \sum_{i=1}^m \sum_{g_i=1}^{I_i} Y_{ig,b} \quad ig_i \in I_b$$

$$S_{(r+1)jk, ig_i, k} \geq C_{rjk, ig_i, k} \quad (8)$$

$$j \neq bj, \forall g_i, k \in M_j, r_{jk} = 1, 2, \dots, N_{jk} - 1$$

$$S_{b+1} \geq C_b \quad b=1, 2, \dots, B-1 \quad (9)$$

$$B_b \leq A \quad \forall b \quad (10)$$

式(4)表示每个工件的每道次的每个工序只能且必须选择一台机器进行加工, 且该机器属于该工序的可选机器集合; 式(5)表示每个工件的每道次的批处理工序, 只能且必须在其中的一批中; 式(6)、式(7)分别表示分配给一般工序、批处理工序的所有可用机器加工的工件总数, 等于所有工件进入生产系统的总次数; 式(8)表示非批处理机在同一时刻只能加工一个工件, 只有前一工件加工完毕, 才能加工后一个工件, 式(9)表示批处理机只有加工完前一批才能加工后一批; 式(10)表示批处理机处理的任何一批的工件数都不能超过批处理机的容量。

工序优先级约束

$$S_{i(j+1)g_i k_2} \geq C_{ijg_i k_1} \quad (11)$$

$$\forall i, \forall g_i, j=1, 2, \dots, n-1; k_1 \in M_j, k_2 \in M_{j+1}$$

$$S_{ij(g_i+1)k} \geq C_{ijg_i k_1} \quad (12)$$

$$\forall i, \forall j, j_1=n, g_i=1, 2, \dots, I_i-1; k \in M_j, k_1 \in M_{j_1}$$

式(11)表示每个工件必须完成上一工序, 才能开始下一工序的加工; 式(12)表示每个工件必须完成上一道次的所有工序(即完成上一道次的最后一个工序), 才能开始下一道次的工序的加工。

工序时间约束

$$C_{ijg_i k} = S_{ijg_i k} + T_{ijg_i k} \quad \forall i, \forall j, \forall g_i, k \in M_j \quad (13)$$

$$C_{ijg_i k} = C_b = S_b + T_b \quad ig_i \in I_b, j = bj, \forall b \quad (14)$$

$$T_b = \max_{ig_i \in I_b} (T_{ijg_i k}) \quad ig_i \in I_b, j = bj, \forall b \quad (15)$$

$$S_b = \max_{ig_i \in I_b} (S_{ijg_i k}) \quad ig_i \in I_b, j = bj, \forall b \quad (16)$$

式(13)、(14)分别表示一般工序、批处理工序的完工时刻取决于其在某个机器上加工的开始时刻以及加工时间; 式(15)、(16)表示批处理工序的加工时间取决于该批中加工时间最大的工件, 开始加工时刻取决于最晚可开始加工的工件。

批处理约束

$$\{T_{ijg_i k} | ig_i = b_h\} = T_b \quad j = bj, \forall h, \forall b, b_h \in I_b \quad (17)$$

$$\{S_{ijg_i k} | ig_i = b_h\} = S_b \quad j = bj, \forall h, \forall b, b_h \in I_b \quad (18)$$

$$B \geq \max_{\forall i} I_i \quad (19)$$

式(17)、(18)表示在批处理时, 同一批内的工件具有相同的处理时间、以及开始、完工时刻; 式(19)表示在存在批处理的可重入车间问题中, 总的批处理批数要大于工件中最大的重入道次。

变量取值范围

$$X_{ijg_i k} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall g_i, k \in M_j \quad (20)$$

$$Y_{ig_i b} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall j, \forall b \quad (21)$$

式(20)、(21)表示决策变量取值范围。

本文研究的调度问题是在满足式(4)~(21)的约束条件下, 最小化批处理机的总能源消耗和总的工件完工时间。

3 基于非支配排序的混合多目标粒子群算法设计

3.1 算法思路

3.1.1 多目标粒子群算法

粒子群优化算法是一种群智能算法, 利用群体

中个体之间的交互作用, 向群体中最优秀的、自身经历中最优秀的位置进化, 依据速度更新公式和位置更新公式来寻找复杂问题空间的最优解; PSO 算法具有快速收敛能力与易于实现的特点, 适合被扩展而应用于多目标优化问题的求解。

解决多目标优化问题, 由于存在目标之间的冲突和无法比较的现象, 可以分别给不同目标分配一定的权重值使之转化为单目标问题, 但不同目标的数量级不同, 权重值也无法科学地给出, Pareto 是最早提出多目标的解不受支配解的概念, 故称为 Pareto 非支配解^[17]。关于支配关系, 定义解 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 解 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, 当且仅当 u 、 v 满足 $\forall i \in \{1, \dots, m\}$, $f_i(u) \leq f_i(v) \wedge \exists j \in \{1, \dots, m\}$, $f_j(u) < f_j(v)$ 时, 称解 u 支配解 v , 记作 $u \succ v$ 。

简单地将粒子群算法扩展为多目标粒子群 (Multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法, 存在全局寻优能力有限与 Pareto 解集多样性不足的问题, SIERRA 等^[18]指出想要完善 MOPSO 算法, 首先需要考虑在算法搜索的过程中, 产生不仅对当前种群非支配、也对过去所有种群都非支配的解, 并构成 Pareto 解集, 其次考虑从当前非支配 Pareto 解集中选择全局最优以及每个粒子的自身最优的策略, 同时要兼顾保持 Pareto 前沿上优化解得多样性。

3.1.2 快速非支配排序

快速非支配排序遗传算法 (Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) 是目前为止解决多目标问题最优秀的算法之一。NSGA-II 算法降低了算法的计算复杂度, 同时也保证了种群的多样性, 已成为目前 MOPSO 算法构成 Pareto 解集的主流方法^[19]。NSGA-II 算法中的快速非支配排序策略, 可以将种群快速分层, 将种群中个体按照非支配关系排序, 使 Pareto 解的分布更均匀, 其操作过程如图 4 所示。

图 4 NSGA-II 快速非支配排序过程

(1) 随机产生规模为 N 的初始种群 P_t , 通过适应度计算和排序、选择、交叉和变异等过程生成子

代种群 Q_i , 将种群 P_i 和 Q_i 合并, 形成规模为 $2N$ 的种群 R_i 。

(2) 种群 R_i 根据支配关系首先得到第一层 Pareto 解集, 等级记为 F_1 , 对种群中剩余个体排序得到 Pareto 解集, 等级记为 F_2, F_3 等, 直到对 R_i 中所有个体分层; 再分别计算每一层的拥挤度, 并根据图示方法选出规模为 N 的种群 P_{i+1} 。

(3) 种群 P_{i+1} 通过算法产生新的子代种群 Q_{i+1} , 将种群 P_{i+1} 和 Q_{i+1} 合并, 形成 R_{i+1} , 重复步骤(2)、(3), 直至满足条件。

3.1.3 拥挤度

NSGA-II 算法中引入拥挤距离的定义, 又被称为拥挤度, 代表同一个非支配等级中某个体与周围其它个体的密集程度, 用来表征个体的均匀性。拥挤度是以个体与其他所有个体中最近的两个个体的距离来计算的, 对于同一个等级的 pareto 解集中的所有个体通过其中一个目标函数值作升序排列, 记为 $i=1, 2, \dots, N_F$, N_F 为非支配等级为 F 的个体总数, 而后对个体 x_i 计算由 x_{i-1} 和 x_{i+1} 组成的长方形的平均边长, 如图 5 所示, 即为该个体的动态拥挤, 具体计算公式^[20]如下

$$i_d = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (22)$$

式中, 边界点的拥挤度设置为无穷大, $i_d = N_{F_d} = \infty$, $f_k^{\max}$ 和 $f_k^{\min}$ 分别表示第 k 个目标函数的最大值、最小值, m 是目标函数的个数。

图 5 个体 i 的拥挤度

根据快速非支配排序与拥挤度计算, NSGA-II 算法定义了拥挤度比较算子 $<_n$, 当且仅当 $i_{rank} < j_{rank}$ 或者 $i_{rank} = j_{rank} \wedge i_d > j_d$ 时, 称 $i <_n j$, 即在比较两个个体的比较时, 首先比较个体的非支配等级, 优先选择等级小的个体, 若两个个体非支配等级相同, 则对比拥挤度, 选择拥挤度大的个体。选择非支配等级小的个体能够保留种群中的精英个体, 使得种群向 Pareto 前沿进化, 而在非支配等级相同的情况下选择拥挤度较大的个体能够保证种群的多样性, 使得 Pareto 解均匀分布, 加快算法

的演化。

3.2 算法流程

针对多目标粒子群算法全局寻优能力有限与 Pareto 解集多样性不足的缺点, 结合 NSGA-II 算法快速非支配排序、拥挤度比较, 以及粒子群算法的变异操作, 本文设计一种基于非支配排序的混合多目标粒子群算法 (Variation-non-dominated sorting particle swarm optimization, V-NSPSO), 算法流程如图 6 所示, 操作步骤如下。

图 6 基于非支配排序的混合多目标粒子群算法

(1) 参数设置以及初始化粒子群。设置粒子群规模 N ; 最大迭代次数 $gnmax$; 三层粒子群的粒子分别的位置取值范围、速度取值范围; 初始惯性权重 ws , 迭代到最大次数时的惯性权重 we ; 加速常数 c_1 , c_2 ; 创新因子系数 c_3 。初始化三层粒子群, 每层分别按照规则随机生成 N 个粒子, 并赋给每个粒子初始位置和初始速度。

(2) 计算三层粒子相应的初始完工时间与退火炉能源消耗, 并将值赋给初始的 $pbestX$ 以记录粒子的个体最优, 通过支配关系得最优 Pareto 解集, 即 $gbestX$, 同时, 令迭代次数 $gn = 0$ 。

(3) 如果满足迭代条件 ($gn < gnmax$), 则算法继续迭代进化执行步骤(4), 否则, 输出最优 Pareto 解集 $gbestX$ 。

(4) 依次对粒子群中每个粒子, 从记录个体最

优粒子的解集 $pbestX$ 中提取当前粒子的个体最优 $pbest$, 并从全局最优解集 $gbestX$ 中随机选取一个粒子作为当前粒子的 $gbest$, 按照公式更新各粒子的速度和位置。

(5) 将更新后的粒子群与 $pbestX$ 合并, 进行快速非支配等级排序, 得到新的最优 Pareto 解集 $gbestX$; 计算粒子的拥挤度, 对比当代粒子与其个体最优, 若当代粒子更优则更新 $pbestX$, 否则保持不变。

(6) 判断当前迭代代数, 若 $gn < 2/3 * gnmax$, 则进行第一种变异操作, 执行步骤(7); 否则, 执行第二种变异操作, 执行步骤(8)。

(7) 根据目标函数 f_1 , 采用轮盘赌的方法选出变异的粒子, 进行变异并将变异后的粒子与 $pbestX$ 合并, 通过非支配等级排序和拥挤度计算, 更新 $pbestX$, $gbestX$; 同样的, 根据目标函数 f_2 , 进行变异并更新最优解集。之后, 令转到步骤(9)。

(8) 对于非支配等级 $F \neq 1$ 的粒子, 进行变异操作, 之后通过非支配等级排序和拥挤度计算, 更新最优解集。转到步骤(9)。

(9) 令 $gn = gn + 1$, 转到步骤(3), 继续迭代进化。

(10) 输出最优 Pareto 解集 $gbestX$ 。

3.3 算法验证

设计试验算例进行试验, 试验目的有: ① 验证本章提出的策略能够有效地提高算法的性能; ② 验证本章设计算法能够解决面向周期式退火炉作批处理机的可重入批离散机流水车间调度问题, 且具备的较好性能。在算法验证的试验中, 所有算法的参数设置均为种群规模 $N = 100$, 最大迭代次数 $gnmax = 200$, 初始惯性权重 $ws = 1.2$, 最终惯性权重 $we = 0.4$; 加速系数 $c_1 = c_2 = 2.05$; 创新因子系数 $c_3 = 0.5$ 。

设计试验算例, 算例中的机器数生成同文献[21]设计一致, 加工单元的加工时间在[1,10]随机分布, 另外, 加工设置批处理机容量为 5, 批处理机运行时的能源消耗 $P_e = P_s = 15$ (能源单位)。验证算例假设工件经组批计划得到 4 个钢管加工单元的待加工钢管, 每加工单元需要经过 2 个道次的加工, 每道次有 3 个工序, 其中前两个工序分别有两个并行机, 最后一个工序有一台机器, 其工件每个工序在机器上的加工时间如表 2 所示。

(1) 个体最优选取策略。为方便描述, 将本文所提算法分别命名, 如表 3 所示。

表 2 验证算例的加工时间表(单位时间)

加工单元		工序 1		工序 2		工序 3
		$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	$M5$
1	道次 1	4	5	6	5	4
	道次 2	5	3	3	4	1
2	道次 1	3	5	3	5	1
	道次 2	3	3	5	2	3
3	道次 1	2	3	4	3	5
	道次 2	4	5	5	4	3
4	道次 1	6	4	7	5	5
	道次 2	5	3	5	3	2

表 3 本文所提算法命名

	MOPSO	V-MOPSO	NSPSO	V-NSPSO
快速非支配等级排序 以及拥挤度策略	×	×	√	√
变异进化操作	×	√	×	√

使用 V-NSPSO、带变异进化操作的多目标粒子群算法 (Variation-multi-objective particle swarm optimization, V-MOPSO) 和非支配排序粒子群算法

(Non-dominated sorting particle swarm optimization, NSPSO) 三种算法求解试验算例, 每个算法运行 20 次, 记录所有的试验结果, 如表 4 所示。

表 4 策略对比试验结果

		V-MOPSO	NSPSO	V-NSPSO
最大完工时间	min	87	91	84
	avg	94.56	101.90	94.44
退火炉能源消耗	min	1 398	1 410	1 368
	avg	1 496.53	1 539.46	1 490.44
Pareto 解个数	avg	4.5	5.9	5.35

由表中结果, 分别将 V-NSPSO 算法的试验运行结果与其他两个算法的作对比: ① 对比 V-NSPSO 算法和 V-MOPSO 的试验结果, V-NSPSO 算法在两个目标函数上都找到更优的最小值, Pareto 解个数水平增加 18.89%, 能够在一定程度上说明在算法中增加快速非支配等级排序以及拥挤度策略, 算法的性能得到优化; ② 对比 V-NSPSO 算法和 NSPSO 的试验结果, V-NSPSO 算法能够在两个目标函数上

都找到更优的最小值, 且平均值相对 NSPSO 算法的求解结果也有大幅度的提高, 能够在一定程度上说明在算法中增加变异操作, 算法的寻优能力得到提高。

将对于该算例运行 20 次的 Pareto 试验结果, 分别通过删除重复解、被支配解, 将所有结果展示在图 7 中, 由图也可明显地看出, V-NSPSO 算法的解基本上分布在 Pareto 解集的前沿。

图 7 个体最优选取策略试验 Pareto 解集汇总与前沿

(2) 算法变异策略。设计了两种变异方式(变异 1: 算法前期的变异策略; 变异 2: 算法后期的变异策略)相结合的 V-NSPSO 算法, 与分别单独使用其

中一种变异操作方式的 V-NSPSO 算法进行算例的求解试验, 每个算法运行 20 次, 分别记录每次的 Pareto 解集, 结果如表 5 所示。

表 5 变异方式对比试验结果

		变异 1	变异 2	两种变异
最大完工时间	min	84	84	83
	avg	96.45	97.46	95.65
退火炉能源消耗	min	1 350	1 383	1 350
	avg	1 506.84	1 505.71	1 488.05
Pareto 解个数	avg	6.25	6.2	5.75

表中结果显示,使用两种变异方式结合的算法,在整体的寻优能力上有一定程度上的提高,故在相同的求解时间且没有增加算法的计算复杂度时,选用两种变异操作方式相结合的策略,能够小幅度提高算法性能。

将对于该算例运行 20 次的 Pareto 解集汇总,分别通过删除重复解、被支配解,将所有结果展示在图 8 中。由图看出,使用两种变异方式结合策略的算法的解优于其他两个使用单一变异策略的算法。

图 8 算法变异策略试验 Pareto 解集汇总与前沿

由图 8 可看出,两种变异操作方式结合的 V-NSPSO 算法在求解此类问题时,其结果的平均水平更靠近 Pareto 解集的前沿。

3.4 应用算例

设计一个应用算例,有 10 个钢管加工单元待加工,每个钢管加工单元每道次 4 个工序,分别都要经历 3 个道次,假设同一工件在各道次的同工序同

一机器上的加工时间相同,各个工序的可选机器数量以及工件在各机器上的加工时间是在以上范围内随机产生的一组数,如表 6 所示。其中:加工设置批处理机容量为 5 个钢管加工单元,批处理机运行时的能源消耗 $P_e = P_s = 40$ (单位)。使用本文设计算法解决此算例,得到结果如图 9、图 10 所示。图 9 为该算例获得的 Pareto 解集。

表 6 应用算例的加工时间表 min

加工单元	酸洗工序		润滑工序			冷拔工序				退火工序	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	38	37	20	16	49	55	55	60	52	35	32
2	35	37	21	19	58	50	54	41	54	26	31
3	33	35	19	16	41	52	60	50	55	32	27
4	38	33	14	17	52	59	40	45	53	26	36
5	35	31	22	17	57	56	56	45	56	39	33
6	35	39	21	18	59	48	55	44	53	29	28
7	38	31	15	18	57	55	57	42	45	34	27
8	38	39	20	17	49	54	50	51	53	39	35
9	37	38	23	18	46	49	41	58	44	26	32
10	38	31	19	16	50	48	52	40	54	30	25

由图 10 可以看出,最大完工时间与退火炉能源消耗呈现相悖关系,最大完工时间越长,意味着在退火工序处钢管的等待时间越多,即进行批处理的批量较大,因而退火炉总运行时间与次数会减少,故退火炉能源消耗量会减少;反之,钢管在批处理时等待时间短就会使得总完工时间减小,但退火炉能源消耗就会增大。因此,通过 Pareto 解的方式可为决策者提供多种可选的调度方案,可依据实际生产情况进行选择,如当生产时间充足,可尽量选取退火炉能源消耗较低的方案,当企业订单繁多追求生产效率时,可尽量选取完工时间较小的方案。

分别选取图 9 中标注的两个解,其中第一个解是追求完工时间最小的调度方案,第二个解是在退

火炉能源消耗较小的情况下选择完工时间适中的调度方案,将其依次展示在图 11、图 12 中。

图 9 算例求解得 Pareto 解集

图 10 迭代时两个目标函数的最小值变化

图 11 完工时间最小的调度方案

图 12 退火炉能源消耗与完工时间适中的调度方案

由图 11, 第一种调度方案的甘特图可以看出, 退火炉加工批量依次为[3,4,4,3,5,3,4,4], 退火炉共运转 8 次, 机器空闲时间均匀分布; 而图 12 第二种调度方案中, 退火炉加工批量依次为[5,5,5,5,5,5], 退火炉共运转 6 次, 但退火炉是连续工作, 这样在实际加工中会更加节约能源。

4 结论

本文针对提出的周期式退火炉作批处理机的可重入批离散机流水车间调度问题, 建立了以完工时间与能源消耗为双目标的优化调度模型, 提出了 V-NSPSO 算法, 算法包括多目标粒子群算法、快速非支配等级排序、拥挤度比较以及粒子变异操作, 并通过试验得到以下结论。

(1) 两组算法优化验证试验, 分别验证了所提算法的采用非支配等级排序与拥挤度比较进行最优粒子的选择策略、两种变异操作方式结合使用的策略能够在一定程度上提高算法的优化求解能力;

(2) 求解应用算例, 证明该算法能够有效地解决此类实际问题, 得到一组综合权衡了完工时间和退火炉能源消耗两个指标的 Pareto 解集, 能够依据实际生产情况进行决策。

参 考 文 献

- [1] GRAVES S C, MEAL H C, STEFEK D, et al. Scheduling of re-entrant flow shops[J]. Journal of Operations Management, 1983, 3(4): 197-207.
- [2] HEKMATFAR M, GHOMI S M T F, KARIMI B. Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan[J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(8): 4530-4539.
- [3] WATANAKICH P. Scheduling for a two-stage hybrid flow shop with machine setup time[M]. Bangkok: Kasetsart University, 2001.
- [4] CHOI H S, KIM H W, LEE D H, et al. Scheduling algorithms for two-stage reentrant hybrid flow shops: minimizing makespan under the maximum allowable due dates[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(9-10): 963.
- [5] DUGARDIN F, AMODEO L, YALAOUI F. Multiobjective scheduling of a reentrant hybrid flowshop[C]// International Conference on Computers & Industrial Engineering, July 6-9, 2009, Troyes, France. Troyes: IEEE, 2009: 193-195.
- [6] DUGARDIN F, YALAOUI F, AMODEO L. New multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 203(1): 22-31.
- [7] 周炳海, 钟臻怡. 可重入混合流水车间调度的拉格朗日松弛算法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 881-886. ZHOU Binghai, ZHONG Zhenyi. Lagrangian relaxation algorithm for scheduling problems of reentrant hybrid flow shops[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(7): 881-886.
- [8] CHALARDKID N, SOMBOONWIWAT T, KHOMPATRAPORN C. Optimal scheduling of two-stage reentrant hybrid flow shop for heat treatment process[C]// 30th European Conference On Modelling And Simulation, May 31st - June 3rd, 2016, Regensburg, Germany. Berlin: ECMS, 2016, 515-519.
- [9] KIM Y D. Minimizing total tardiness of orders with reentrant lots in a hybrid flow shop[J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(11): 2149-2167.

- [10] JIANG S, TANG L. Lagrangian relaxation algorithms for re-entrant hybrid flowshop scheduling[C]// International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, December 19-21, 2020, Taipei, China. New York: ICIII, 2008, 78-81.
- [11] 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.
- [12] ZHOU B H, HU L M, ZHONG Z Y. A hybrid differential evolution algorithm with estimation of distribution algorithm for reentrant hybrid flow shop scheduling problem[J]. Neural Computing & Applications, 2016, 30(8): 1-17.
- [13] IKURA Y, GIMPLE M. Scheduling algorithms for a single batch processing machine [J]. Operation Research Letters, 1986, 5(1): 61-65.
- [14] BRUCKER P, GLADKY A, HAN H, et al. Scheduling A Batching Machine[J]. Journal of Scheduling, 1998, 1(1): 31-54.
- [15] 轩华. 含串行批处理机的三阶段混合流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 1006-1010. XUAN Hua. Three-stage HFS scheduling problem with serial batching machines[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 1006-1010.
- [16] 赵玉芳, 唐立新. 极小化最大完工时间的单机连续型批调度问题[J]. 自动化学报, 2006, 32(5): 730-737. ZHAO Yufang, TANG Lixin. Scheduling a single continuous batch processing machine to minimize makespan[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(5): 730-737.
- [17] VELDHUIZEN D A V, LAMONT G B. Multiobjective evolutionary algorithms: Analyzing the state-of-the-art[J]. Evolutionary Computation, 2014, 8(2): 125-147.
- [18] SIERRA M R, COELLO C A C. Improving PSO-based multi-objective optimization using crowding, mutation and ϵ -dominance[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3410: 505-519.
- [19] 陈民铀, 张聪誉, 罗辞勇. 自适应进化多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(12): 1851-1855. CHEN Minyou, ZHANG Congyu, LUO Ciyong. Adaptive evolutionary multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2009, 24(12): 1851-1855.
- [20] 周严伟. 基于快速非支配排序遗传算法的多目标流水车间调度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. ZHOU Yanwei. Research of multi-objective flow scheduling based on fast non-dominated sorting genetic algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [21] 陈晓慧, 张启忠, 易树平, 等. 基于遗传算法的可重入钢管生产优化调度[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 1067-1071. CHEN Xiaohui, ZHANG Qizhong, YI Shuping, et al. Optimal scheduling of steel tube re-entrant lines based on a genetic algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 1067-1071.

作者简介: 顾涛, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为供应链计划优化、备件库存优化、生产调度优化等。
E-mail: babygo1003@163.com