

改进灰狼算法求解复杂混合流水调度问题研究

孟荣华¹, 孙艾文¹, 吴正佳¹, 朱颖颖¹, 陈保家¹, 张彪², 饶运清³

(1. 三峡大学机械与动力学院, 湖北宜昌 443002; 2. 聊城大学计算机学院, 山东聊城 252000; 3. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 本文研究了带切割工序生产企业的工件调度优化问题. 以最小化所有工件的最大完工时间为目标, 建立了考虑一对多加工约束的混合流水调度问题的两阶段数学模型. 设计了基于问题特征的协同奔袭灰狼算法, 制定了新的编码规则和狼群分级策略, 改进了探狼游走策略, 并提出了猛狼协同奔袭策略. 通过改进的标准算例对 GA、GWO 和 CDGWO 算法进行参数敏感性测试及求解对比. 求解小规模问题时算法差异不明显, 但是随着问题规模的增大, CDGWO 求解效果性能稳定且进化效率较好.

关键词: 混合流水调度问题; 灰狼算法; 协同奔袭; 最大完工时间

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)08-1515-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20191319

Research on Complex Hybrid Flow-Shop Scheduling Problem Solved by Improved Grey Wolf Optimizer

MENG Rong-hua¹, SUN Ai-wen¹, WU Zheng-jia¹, ZHU Ying-ying¹, CHEN Bao-jia¹, ZHANG Biao²,
RAO Yun-qing³

(1. School of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. School of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China;

3. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: This paper studies an optimization problem of the production scheduling with cutting process. A two-stage mathematical model of hybrid flow-shop scheduling problem with one-to-many constraints is established to minimize the makespan of all jobs. A cooperative attacking GWO is designed according to the problem feature, a new encoding scheme and the social hierarchy are developed. The search for the prey strategy is improved, and the collaborative running attack strategy is proposed. The sensitivity test and the results comparison of GA, GWO and CDGWO are carried out by the improved standard test. Algorithms are not significantly different when solving small-scale problems. As the scale increasing, the CDGWO performs very stable and the evolutionary efficiency shows very well.

Key words: hybrid flow-shop scheduling problem; grey wolf optimizer; cooperative attack; maximum completion time

1 引言

混合流水调度问题 (Hybrid Flow-Shop Scheduling Problem, HFSP) 是由 Salvador^[1] 在 1973 年首次提出的, 与流水调度问题 (FSP) 相比, HFSP 至少有一个阶段的机器数量是大于 1 的. 该问题更符合企业的生产实际, 且更加复杂, 所以在近几年, 得到了国内外广大学者的关注^[2,3].

针对国内外研究 HFSP 的文献综述可知, 杜利珍等人^[4] 针对不相关并行机 HFSP 进行了研究; 清华大学的王圣尧等人^[5] 系统性研究了 HFSP; 姚远远等人^[6] 研究了可重入 HFSP, 考虑了最小化最大完工时间和总拖期最小两个目标, 并设计了一种改进的灰狼算法进行求解; 另外, Li 和 Pan^[7] 研究了最小化完工时间的带有限缓冲的 HFSP, 并设计了一个混合算法进行求解; Lei^[8]

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2020-12-26; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 宜昌市科技局应用基础研究(No.A20-3-008); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2019kfyXKJC043); 国家自然科学基金面上项目(No.51975324, No.51975231)

针对双-Agent HFSP进行了研究,并分析了模型的可行性;Komaki等人^[9]利用改进的免疫算法求解了两阶段装配的HFSP,最优化工件的最大完工时间;Jun和Park^[10]以变压器的生产现状为背景,研究了考虑夜间工作和同时工作约束的HFSP,并基于问题的特征,设计了合适的算法降低工件的总拖期。

综上所述,HFSP已经被越来越多的研究人员关注,且更偏重考虑企业的生产实际^[11]。现有文献中,暂时没有发现研究切割与机加工工序共同优化的问题。现有的生产中,切割车间是典型的并行机调度问题,而机加工车间的排产为FSP,但是,考虑切割车间的FSP并不是一个简单的HFSP,因为切割阶段的板材与机加工阶段的零件是有包含关系的,在机加工车间加工的多个零件在切割阶段是合并在一张板材上加工的。本文将其定义为一对多的带加工工艺约束(Process Constraints)的复杂HFSP(PHFSP)。这种生产方式可以应用于船舶企业、重工企业、玻璃行业、成衣企业等。因此,本文针对此类PHFSP进行了研究。

排产调度问题是典型的组合优化问题,总结求解生产调度问题的算法,将其分为精确算法和启发式算法两大类。精确算法又包括整数规划法和分支定界法、拉格朗日松弛法等。随着研究的深入,启发式算法被逐渐改进应用到调度领域,包括遗传算法^[12]、粒子群算法^[13]等智能方法。2014年,Mirjalili等人^[14]提出了灰狼优化(Grey Wolf Optimizer, GWO)算法,该算法与已有算法不同,是一种全新群智能算法,由灰狼群体捕食机制演化而来的元启发式算法。GWO算法的优点比较明确,具有良好的广度开拓和深度开采能力,且算法设计简单。与其他群智能算法相比,需要确定的初始参数较少,求解速度迅速,算法被提出以来,得到了众多学者^[15-18]的关注,并已被证明其在求解优化问题时的各指标表现优异。

综上所述,本文拟针对带切割工序的工件排产调度优化问题,建立一对多加工约束的HFSP的两阶段数学模型。最简单的HFSP的特例,也已被证明是NP难问题^[19],因此,本文将改进基于问题特征的协同奔袭灰狼算法,设计新的编码规则和狼群分级策略,优化探狼游走策略,并提出猛狼协同奔袭策略。

2 PHFSP数学模型建立

2.1 问题描述

本文以板材切割及后序的零件机加工为研究对象,描述需要解决的PHFSP如下: n 张板材首先从 m 台功能相同、性能不同的并行切割机中选择一台进行加工,每张板材包含多个零件, n 张板材经过切割得到 n'

($n' \geq n$)个零件; n' 个零件按照相同的顺序,依次经过机加工 m' 个阶段的 m' 台加工机器(每个阶段仅有一台加工机器)。在该PHFSP里面,并行机调度的板材与后序调度的零件之间为一对多的包含关系。本问题需要求解板材的机器安排、板材的切割顺序、零件的加工顺序,是涉及三个子问题协同优化的复杂问题。

2.2 问题假设

该PHFSP的假设包括任何工件(板材或零件)不能被优先加工;工件(板材或零件)开始加工后就不能被中断;板材和零件之间的一对多包含关系已知且固定;本文不考虑工序之间的物流时间;假设工序间缓冲区容量无限大。不同类型的板材,在同一台切割机上的速度是不一样的;而同一板材在不同的切割机上对应的速度也是不一样的,但是同一板材在同一切割机上的加工时间和速度不会因为工件的加工顺序不同而有所不同。

2.3 符号和数学模型建立

以下符号用于构建本节提出的PHFSP。为了避免混淆,根据并行机阶段与后序流水阶段的调度对象不同的特性,本文采用了两阶段建模方法。符号说明如表1所示。

利用表1所述符号建立以最小化最大完工时间为目标的两阶段数学模型和约束。

目标函数:

$$f = \min C'_{\max} \quad (1)$$

切割阶段的约束:

$$C_i = \begin{cases} 0, & i=0 \\ \sum_{g=0}^n y_{gip} * (C_g + T_i^s + L_i/v_{ip} + T_i^p), & i=1, 2, \dots, n; \\ & p=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^m x_{ip} = 1; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{g=0}^n \sum_{p=1}^m y_{gip} = 1; \quad g \neq i; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{p=1}^m y_{gip} = 1; \quad i \neq g; \quad g=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{ip} \leq z'_{ip}; \quad i=1, 2, \dots, n; \quad p=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式(2)表示各工件(板材)的切割工序完工时间;式(3)表示每个工件(板材)必须且只能分配到1台机器进行加工;式(4)表示在每台机器上每个工件 i 的前序工件有且只有一个,第一个加工工件 i 的前序工件为虚拟工件0;式(5)表示在每台机器上,工件最多有一个后序工件,最后加工工件的虚拟工件为 $n+1$;式(6)表示工件 i 只能在可用的加工机器集合里选择机器进行加工。

加工阶段约束:

表 1 符号说明

符号	描述	符号	描述
n	切割阶段工件的数量	m	切割阶段机器的数量
n'	机加工阶段工件的数量	m'	机加工阶段机器的数量
i, g	切割阶段工件的索引 $i, g = 1, 2, \dots, n$	j, l	机加工阶段工件的索引 $j, l = 1, 2, \dots, n'$
p	切割阶段机器的索引 $p = 1, 2, \dots, m$	q	机加工阶段机器的索引 $q = 1, 2, \dots, m'$
T'_{jq}	机加工阶段工件 j 在机器 q 上的加工时间	C'_{jq}	工件 j 在机器 q 上的完工时间
T_i^s	工件 i 在切割阶段的准备时间	C'_{\max}	零件在机加工阶段的最大完工时间
T_i^p	工件 i 在切割阶段的收件时间	v_{ip}	工件 i 在机器 p 上的切割速度
L_i	工件 i 的切割长度	C_i	板材 i 在切割阶段的完工时间
z_{ij}	1 工件 i 切割后得到工件 j 0 其他	z'_{ip}	1 工件 i 可在机器 p 上加工 0 其他
决策变量		决策变量	
x_{ip}	1 板材 i 在机器 p 上加工 0 其他	y'_{lj}	1 工件 l 是工件 j 的前序工件 0 其他 $\forall l \in \{0\} \cup J', \forall j \in J' \cup \{n'+1\}$
y_{gip}	1 板材 g 是板材 i 在机器 p 上的前序工件 0 其他 $\forall g \in \{0\} \cup J, \forall i \in J \cup \{n+1\}$		

注:其中 z_{ij} 和 z'_{ip} 是已知的,且板材 i 切割后可以得到多个工件零件,而一个零件却只能对应一张板材。

$$C'_{jq} = \begin{cases} 0, & q = 0 \\ \max \left(\max_i \left(\sum_{p=0}^m z_{ij} * x_{ip} * C_{ip} \right), \sum_{l=0}^{n'} y'_{lj} * C'_{lq}, C'_{j(q-1)} \right) + T'_{jq}, & \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, n'; \\ q = 1, 2, \dots, m' \end{matrix} \end{cases} \quad (7)$$

$$C'_{\max} = \max C'_{jq} \quad j = 1, 2, \dots, n'; \quad q = 1, 2, \dots, m' \quad (8)$$

$$\sum_{l=0}^{n'} y'_{lj} = 1 \quad l \neq j; \quad j = 1, 2, \dots, n' \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{n'+1} y'_{lj} = 1 \quad j \neq l; \quad l = 1, 2, \dots, n' \quad (10)$$

约束式(7)表示计算零件在各机器上的完工时间,约束式(8)表示各零件的最大完工时间,约束式(9)表示工件 j 只能有一个前序工件,约束式(10)表示工件 l 只能有一个后序工件。

3 灰狼算法介绍

在灰狼群中,有一个意味着权力和统治的社会层级制度.该层级制度依据不同职责分工,将灰狼划分为 α 、 β 、 δ 狼^[20],剩余的狼称为 ω 狼.一般情况下,将第一层级的 α 狼作为领头狼;第二层级灰狼称为 β 狼,服从于 α 狼,同时协助 α 狼作出决策;最低社会层级的灰狼为 ω 狼,一般需要听命于其他灰狼.社会层级的第三层级为 δ 狼,服从于 α 狼和 β 狼的领导,也可以指挥 ω 狼.

灰狼群除了具有社会分层的特点,还具有围猎特征,包括:搜索、追踪、接近猎物;追捕、包围和骚扰猎物

至猎物停止移动;攻击猎物. GWO 算法过程的具体步骤如下.

3.1 社会等级分级

在设计 GWO 算法时,为了模拟灰狼的社会等级,在单目标问题的求解中,将最优解当做 α 狼,同时,次优和第三优的解分别命名为 β 狼和 δ 狼,剩余灰狼称为 ω 狼,如图 1 所示.

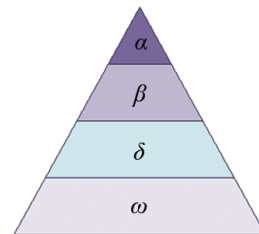


图 1 灰狼社会分层等级示意图(高层支配低层)

3.2 包围猎物

为了更好地为本文的算法服务,将灰狼群在捕猎过程中的围猎行为进行数学建模^[14]:

$$D = CX_p(t) - X(t) \quad (11)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (12)$$

其中, t 表示当前迭代代数, A 和 C 表示向量系数, $X_p(t)$ 表示猎物的位置向量; $X(t)$ 表示当前灰狼的位置向量.

向量系数 A 和 C 用如下公式表示:

$$A = 2ar_1 - a \tag{13}$$

$$C = 2r_2 \tag{14}$$

在迭代过程中, a 由 2 线性下降到 0, 主要用于调整搜索区域的大小. 系数 r_1 和 r_2 服从 $[0, 1]$ 分布, 随机产生.

3.3 狩猎数学模型

灰狼群在捕猎过程中搜索猎物(最优解), 并围攻猎物. 为了建模并仿真灰狼群的狩猎行为, 假设 α 狼(最优候选解), β 和 δ 比其他灰狼更接近于猎物(最优解), 数学化描述该狩猎过程为: 保存每次迭代排名前三的最优解, 在其引导下, 其他灰狼朝向可能的全局最优解前进. 狩猎行为的公式如下

$$\begin{aligned} D_\alpha &= C_1 \cdot X_\alpha - X \\ D_\beta &= C_2 \cdot X_\beta - X \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} D_\delta &= C_3 \cdot X_\delta - X \\ X_1 &= X_\alpha - A_1 \cdot (D_\alpha) \end{aligned}$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot (D_\beta) \tag{16}$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot (D_\delta)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \tag{17}$$

式(15)~式(17)描述的是在 α, β 和 δ 三匹头狼领导下的搜索过程. 系数 A 可以调整搜索方向. 当 $|A| \geq 1$ 时, 扩大灰狼的搜索区域, 避免陷入局部最优, 当 $|A| < 1$ 时, 表示在某一区域内重点搜索, 局部搜索当前区域的最优解. 满足停止准则时, 最终最优解(猎物)输出.

3.4 搜索猎物

为了用数学化的方式表示搜索过程, 利用随机值 A 大于 1 或者小于 -1 引导算法的搜索远离猎物, 在全局范围内完成搜索, 以便寻找比当前猎物(当前解)更好的猎物(更优解). 从式(14)可知, 系数 C 的取值为 $[0, 2]$ 上的随机数. 该系数可以有效改善 GWO 算法的搜索行为. 另外, 系数 C 的随机性, 可以有效避免算法迭代过程中特别是迭代后期陷入局部最优.

4 基于协同奔袭策略的灰狼算法设计

针对本文提出的复杂 PHFSP, 本文设计了十进制编码的协同奔袭 GWO (Collaborative Attacking Decimal GWO, CDGWO) 算法, 具体流程如图 2 所示.

4.1 编码规则

本文所求问题为典型离散组合优化问题, 因此根据问题特点选用了十进制编码方式, 即将每个工件(板材或者零件)用一个十进制整数表示, 构成一个十

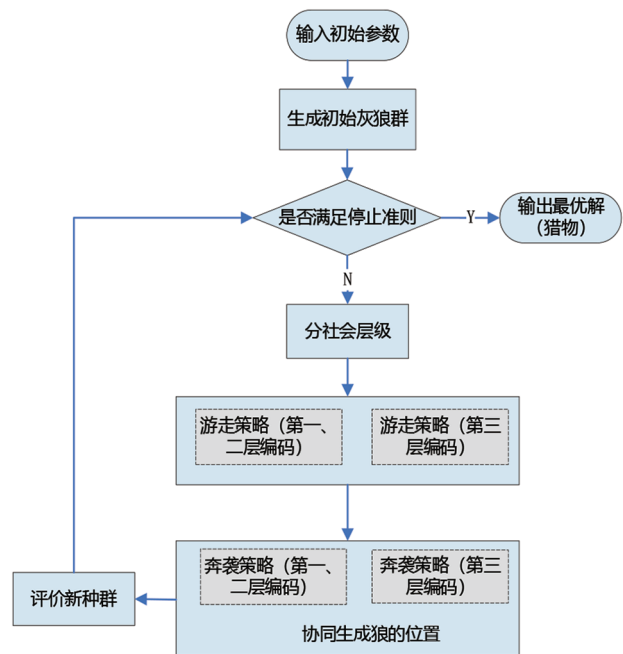


图2 CDGWO算法流程图

进制序列 π_i , 即整数编码的 CDGWO 算法中每一匹灰狼的位置.

$$\pi_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}) \tag{18}$$

其中, $n = 2n + n'$; $i = 1, 2, \dots, M$. 该编码根据问题特征分为三层, 描述如下.

第一层编码: $x_{ip} \neq x_{iq}; p \neq q; x_{ip}, x_{iq}, p, q = 1, 2, \dots, n$. 表示的是切割并行机阶段板材的编码.

第二层编码: $x_{ip} \leq m; n + 1 \leq p \leq 2n$. 工件对应切割机器的代码, 板材在机器中的切割顺序通过板材序列从左到右出现的先后次序来表示.

第三层编码: $x_{ip} \neq x_{iq}; p \neq q; x_{ip}, x_{iq} = 1, 2, \dots, n; p, q = 2n + 1, 2n + 2, \dots, 2n + n'$. 表示机加工阶段零件编码及加工顺序.

M 表示狼群规模, i 表示工件的索引, j, p, q 表示每个个体里面元素的索引, 其他字符说明见符号描述. 当采用该编码方式时, 问题求解的难点在于如何处理模型中的工艺约束、并行机部分的机器分配以及工件顺序问题.

解码策略: 解码时首先解码切割阶段, 将切割工件分配到各切割机器上, 按顺序计算得出切割阶段各板材的加工结束后, 解码机加工阶段的工件, 计算各工件的加工结束时间.

4.2 狼群分级

采用随机的方式初始化狼群, 第一层编码生成长度为 n 的没有重复的 $1 \sim n$ 随机序列, 第二层编码在对应编码位的可用机器集合中随机选择可用机器编码; 第三层编码随机生成 $1 \sim n'$ 个不重复十进制序列. 计算狼

群中每匹狼的位置(目标函数值),将头三匹狼(按照目标函数值从优到劣排序)选为头狼 α 、 β 和 δ ,剩余的狼视为 ω 狼.

由于猎物(最优解)是不确定的,并不知道具体在什么位置,头狼被认为是能力最强,且最接近于猎物的,所以探狼均在头狼的带领下靠近猎物.根据灰狼狩猎过程中的追捕、围猎行为以及猎物分配方式,抽象出探狼游走、猛狼围猎奔袭这两种智能行为以及“胜者为王”(目标函数值更优的个体)的头狼更新规则.

4.3 狼群游走策略

灰狼游走搜索猎物,抽象为在解空间中搜索最优解.根据问题特点,针对十进制编码方式,本文改进了GWO的游走行为,提出一种适合求解该复杂问题的游走运动算子,包含移位和重新分配机器两种操作.

针对第一层并行机工件编码部分,从排列中随机选择一个元素,应用如下游走搜索策略:

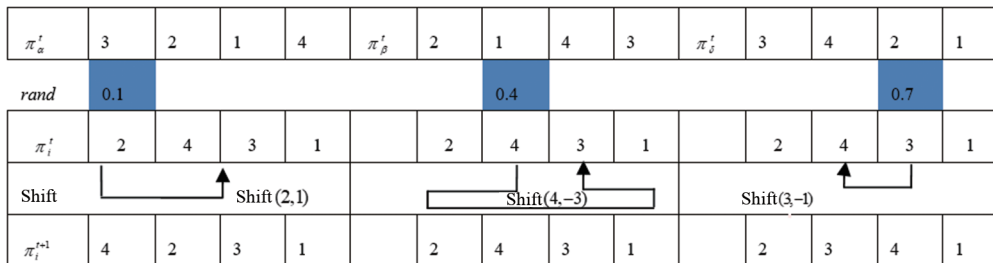


图3 灰狼游走示意图

针对第二层机器编码部分,被选择第 γ 个元素 i 对应的机器则重新从可用机器集合 M_{F_i} 中选择生成.

第三层的编码进化策略与第一层保持一致.

每一层编码执行游走策略之后,新生成的三层编码构成新的灰狼个体,形成新的灰狼的位置,与游走前探狼的位置对比,采用“胜者为王”策略择优保存.保存的灰狼个体构成新一代狼群 S_{t+1} .

4.4 协同奔袭操作

探狼游走转化为猛狼,头狼嚎叫召唤猛狼,指挥它们向猎物所在的位置 π^* 靠近,进行围猎.原始的GWO算法有2个系数对搜索方向进行调整,可以有效避免陷入局部最优,针对离散CDGWO算法的特点,本文设计了协同奔袭操作,主要功能为协助个体跳出局部最优.

两点交换奔袭策略被应用于所选择个体 π 的第一部分,对应的机器编码从可用机器集合里面随机选择.将需要奔袭的灰狼第一、二层编码记为 π^{12} ,第三层记为 π^3 .

第一层:随机选择两个不同位置的元素,进行交换操作得到新的编码.

第二层:第一层两个位置在第二层的对应元素,进

$$\pi'' = \begin{cases} \text{shift}(\pi'_\gamma, d) & d = z \left((\pi'_\alpha)_\gamma^t - (\pi)_\gamma^t \right), & \text{if } rand < \frac{1}{3} \\ \text{shift}(\pi'_\gamma, d) & d = z \left((\pi'_\beta)_\gamma^t - (\pi)_\gamma^t \right), & \text{if } \frac{1}{3} \leq rand < \frac{2}{3} \\ \text{shift}(\pi'_\gamma, d) & d = z \left((\pi'_\delta)_\gamma^t - (\pi)_\gamma^t \right), & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

其中, π 、 π_α 、 π_β 、 π_δ 分别是探狼 ω 、头狼 α 、 β 、 δ 编码; π'_γ 、 $(\pi'_\alpha)_\gamma^t$ 、 $(\pi'_\beta)_\gamma^t$ 、 $(\pi'_\delta)_\gamma^t$ 分别表示在第 t 次迭代开始时位于各灰狼的第 γ 个元素对应的板材编号; π' 是探狼更新后的工件编码,亦即猛狼的工件编码; $rand$ 是在0~1范围的随机值; z 是控制元素,在该问题中,设置 z 为1.

$\text{shift}(\pi'_\gamma, d)$ 表示 π 中的第 γ 个元素从当前位置向右或者向左移动 $|d|$ 个单位, d 的符号为+表示向右,符号为-表示向左;如果向左移动过程中超过了左侧边界,则继续从右侧边界向左移动;如果向右移动,规则一样.图3详细阐述了该搜索过程.

行交换操作;该操作的意思为不改变切割的机器,仅改变每台机器上工件的切割顺序;第一层与第二层编码合并为 π^{12} .

第三层:随机选择两点,进行两点交换操作,改变机加工车间的工件加工顺序,得到编码 π'^3 .以上原始灰狼与两点交换后的灰狼四段编码执行协同奔袭操作,得到新的三匹灰狼个体 $[\pi^{12}, \pi^3]$, $[\pi'^{12}, \pi^3]$, $[\pi'^{12}, \pi'^3]$,如图4所示.

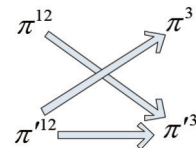


图4 协同奔袭示意图

计算新个体的位置,从游走后的狼群中随机选择对比狼,采用“胜者为王”策略择优保存.

4.5 CDGWO算法的具体步骤

步骤1 初始化.设定灰狼群的规模为 M ,设置算

法最大迭代次数为 k_{\max} , 初始化狼群.

步骤2 根据“胜者为王”的头狼产生规则, 选择猎物位置最优的三匹狼(即完工时间最小)为头狼 α 、 β 、 δ , 剩余的灰狼为探狼 ω , 执行游走策略.

步骤3 根据三匹头狼召唤, 探狼随机选择一匹奔袭的头狼, 探狼游走转化为猛狼. 根据奔袭概率, 猛狼对猎物发起围攻行为, 即执行奔袭运动策略, 根据围攻前后目标函数值大小, 进行贪婪决策.

步骤4 按照头狼角逐规则对三匹头狼进行更新.

步骤5 判断算法的终止条件, 满足条件则输出问题的最优解, 即头狼 α 的位置编码 π_{α} 和猎物位置 $f(\pi_{\alpha})$, 否则转步骤2.

5 实验设计及结果对比

5.1 实验设计与参数设置

在本节中拟针对不同规模的算例讨论 CDGWO 算法的有效性. 切割并行机调度部分采用文献[21]中用过的 benchmark 算例, 并综合考虑切割车间的部分实际生产数据. 表2展示的是算例数据集的分布, 其中工件的材质设为三类, 加工流水车间机器数量设置为6. 根据较大范围内的均匀分布, 可以满足数据多样性的需求原则, 本文采用了 Hariri 和 Potts^[22]提出的 $U[1, 100]$ 分布, 随机生成机加工阶段工件在各机器上的加工时间.

表2 数据分布生成

变量	分布
切割阶段工件数量(n)	5, 10, 20
机加工阶段工件数量(n')	20, 40, 60, 80
机器的类型数量(d)	3
切割速度矩阵(V)	$\begin{bmatrix} 1.5 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 2.5 \\ 0 & 2.5 & 1 \end{bmatrix}$ 随机选择
切割长度(L)	$U[101, 200]$
准备时间(T^s)	$U[1, 20]$
收件时间(T^p)	$U[1, 20]$

5.2 实验结果及对比

5.2.1 算法性能评价指标介绍

为了评价算法求解 PHFSP 的有效性, 本文选取了最优值(Best), 平均值(Mean), 相对偏差(RPD), 标准差(SD)四个指标, 用于评价算法的求解效率.

5.2.2 算法参数敏感度测试

由于算法参数的设置对算法影响较大, 本文对 CDGWO 进行了参数敏感性测试实验, 将种群规模分别

设置为 60/80/100 的同时, 变异概率设定为 0.1 和 0.2, 迭代次数设置为 $10(n+n')$. 运行结果如表3所示. 发现随着板材数量的增加, 种群规模设定成 100, 变异概率设置为 0.2 的程序运行算例的结果均为同组最优, 且在处理较大规模的问题时更具优势.

另外本文也对 GA 算法和 GWO 算法的参数进行了测试, 但是两个算法的各指标表现比较一致, 所有参数在各方面表现均比较一般. 根据两个算法最优值和平均值表现, 在参数 (100, 0.1) 组合下指标表现最好. 因此将 GA 和 GWO 算法参数设置为 (100, 0.1), 将 CDGWO 算法参数设置为 (100, 0.2).

5.2.3 算法运行效果对比

将 GA、GWO、CDGWO 三个算法独立运行 5 次, 得到各算法求解不同问题的运行时间, 其平均值向上取整, 作为迭代停止条件, 各自独立运行 20 次. 求解得到各对比指标如表4所示, 其中横向表头表示的是切割并行机车间的板材数量和零件数量, 零件数量括号里面是各规模问题运行时间. 纵向表头表示的是指标和三个算法.

从表3和表4中的各统计值可以看出, GWO 算法在求解过程中较标准 GA 算法更优, 而改进的 CDGWO 算法较 GWO 算法表现更好. CDGWO 算法在求解不同规模问题取得与 GWO 算法一致的最优解, 随着板材数量的增大, GWO 算法与 CDGWO 算法的最优解和平均解指标值表现非常好; 在切割板材数量较小时, 特别是在平均值性能的表现上, CDGWO 算法几乎取得了所有规模问题平均值最优. 指标 RPD 和 SD 的统计数据表明: 除个别问题之外, 本文设计的 CDGWO 算法的指标均优于其他两种对比算法. 上述结果充分说明 GWO 算法在求解小规模协同调度问题时, 搜索最优解的过程是非常有效的, 改进后的 CDGWO 算法更适合求解大规模问题, 且较其他对比算法更加稳定.

5.2.4 算法收敛性分析

为了对比各算法的求解效率, 利用 GA、GWO、CDGWO 三种算法求解规模为 (20, 80) 的问题, 用 Matlab 绘制迭代的最优值进化图如图5所示.

由图5可知, 虽然 GA 算法进化速度较快, 但是容易陷入局部最优, 很难搜索到最优值; GWO 算法进化速度偏慢, 收敛较晚, 但是与 GA 算法相比具有更好的寻优能力, 可以搜索到更优的解; CDGWO 算法在 GWO 算法的基础上进行了改进, 有效解决了进化速度慢的问题, 可以较早地达到收敛, 并能搜索到较 GWO 算法更优的解.

表 3 不同种群规模和变异概率下的 Mean/SD 统计

板材数量		5				10				20			
种群规模/ 变异概率	零件数量 (时间)	20(3s)	40(5s)	60(9s)	80(14s)	20(4s)	40(7s)	60(11s)	80(16s)	20(5s)	40(9s)	60(14s)	80(20s)
	Mean	60/0.1	1441	2471	3661	4781	1419	2453	3665	4767	1449	2463	3633
60/0.2		1443	2469	3661	4780	1416	2447	3650	4752	1448	2458	3622	4763
80/0.1		1439	2474	3664	4770	1418	2454	3655	4763	1448	2461	3619	4767
80/0.2		1440	2476	3656	4783	1417	2448	3666	4750	1437	2465	3621	4770
100/0.1		1440	2472	3661	4775	1417	2449	3657	4762	1447	2458	3624	4770
100/0.2		1441	2467	3659	4775	1419	2448	3649	4751	1435	2456	3605	4761
SD	60/0.1	10.38	6.87	10.56	20.61	6.56	13.03	28.69	33.97	17.22	11.75	26.23	12.41
	60/0.2	11.24	4.52	19.63	20.34	4.19	9.08	15.7	22.62	15.24	7.78	29.13	13.02
	80/0.1	9.84	10.3	12.69	8.78	7.12	11.64	20.73	26.67	17.55	10.56	26.75	16.91
	80/0.2	6.29	9.47	15.97	15.3	4.8	8.85	25.29	18.56	12.06	11.53	24.95	16.31
	100/0.1	8.76	7.43	14.93	13.99	4.77	10.72	29.78	19.88	14.31	8.94	25.45	17.87
	100/0.2	3.43	2.56	16.96	12.53	7.6	8.52	21.72	15.35	7.39	7.13	20.43	9.87

表 4 对比算法的各指标值统计

板材数量		5				10				20			
指标与 算法	零件数量 (时间)	20(3s)	40(5s)	60(9s)	80(14s)	20(4s)	40(7s)	60(11s)	80(16s)	20(5s)	40(9s)	60(14s)	80(20s)
	Best	GA	3730	4830	1438	2511	3700	4839	1480	2516	3723	4876	3730
GWO		3644	4758	1414	2440	3641	4744	1445	2450	3605	4756	3644	4758
CDGWO		3610	4758	1414	2440	3614	4733	1425	2450	3590	4754	3610	4758
Mean	GA	3810	4909	1481	2550	3780	4895	1588	2610	3824	4935	3810	4909
	GWO	3681	4778	1415	2459	3675	4772	1465	2477	3641	4774	3681	4778
	CDGWO	3663	4771	1418	2451	3666	4749	1441	2462	3617	4776	3663	4771
RPD	GA	2.15%	1.64%	2.96%	1.56%	2.17%	1.15%	7.32%	3.72%	2.70%	1.21%	2.15%	1.64%
	GWO	1.02%	0.42%	0.09%	0.79%	0.92%	0.59%	1.36%	1.10%	1.01%	0.38%	1.02%	0.42%
	CDGWO	1.46%	0.28%	0.27%	0.47%	1.43%	0.33%	1.11%	0.48%	0.76%	0.46%	1.46%	0.28%
SD	GA	34	40	22	28	40	32	59	38	43	47	34	40
	GWO	36	14	3	15	28	26	15	16	19	19	36	14
	CDGWO	23	12	5	12	29	15	11	11	25	31	23	12

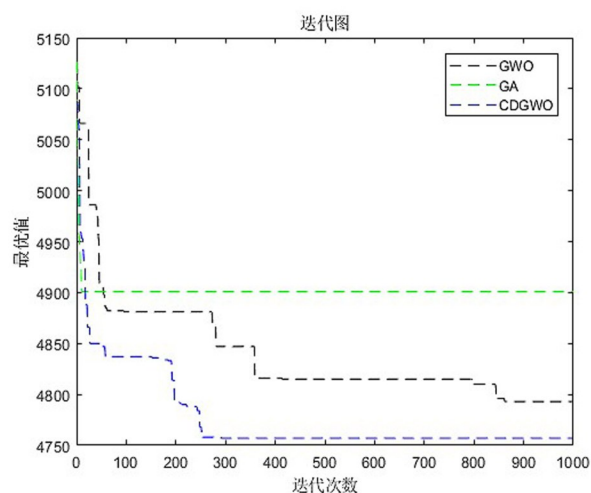


图5 (20,80)问题的对比算法迭代进化图对比

6 结论

本文根据切割车间加工过程中的工件特点,建立了带一对多加工约束的复杂PHFSP,分析问题特点和难点,设计了改进的CDGWO算法进行求解.针对切割与机加工车间板材切割完毕后,零件方可进行机加工操作的特点,设计了三层编码方案,巧用GWO的分级策略和游走策略,设计了协同奔袭操作.利用仿真算例测试了所涉及算法参数的敏感性,并选择了合适的算法参数;通过仿真实验结果对比和收敛性分析可知,改进后的算法求解效率较高,解的质量优良.

参考文献

- [1] Salvador M S. A solution to a special class of flow shop scheduling problems[A]. Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications[C]. Berlin Heidelberg Germany: Springer, 1973. 83 – 91.
- [2] 任彩乐, 张超勇, 孟磊磊, 等. 基于改进候鸟优化算法的混合流水线调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 643 – 653.
Ren C L, Zhang C Y, Meng L L, et al. Hybrid flow-shop scheduling problems based on improved migrating birds optimization algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 643 – 653. (in Chinese)
- [3] Ruiz R, Vázquez-Rodríguez J A. The hybrid flow shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(1): 1 – 18.
- [4] 杜利珍, 王震, 柯善富, 等. 混合流水线调度问题的果蝇优化算法求解[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1480 – 1485.
Du L Z, Wang Z, Ke S F, et al. Fruit fly optimization algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problems [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1480 – 1485. (in Chinese)
- [5] 王圣尧, 王凌, 许焯, 等. 求解混合流水线调度问题的分布估计算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(3): 437 – 443.
Wang S Y, Wang L, Xu Y, et al. An estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(3): 437 – 443. (in Chinese)
- [6] 姚远远, 叶春明, 杨枫. 双目标可重入混合流水线调度问题的离散灰狼优化算法[J]. 运筹与管理, 2019, 28(8): 190 – 199.
Yao Y Y, Ye C M, Yang F. Solving Bi-objective reentrant hybrid flow shop scheduling problems by a hybrid discrete grey wolf optimizer[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(8): 190 – 199. (in Chinese)
- [7] Li J Q, Pan Q K. Solving the large-scale hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers by a hybrid artificial bee colony algorithm[J]. Information Sciences, 2015, 316(1): 487 – 502.
- [8] Lei D M. Two-phase neighborhood search algorithm for two-agent hybrid flow shop scheduling problem[J]. Applied Soft Computing, 2015, 34: 721 – 727.
- [9] Komaki G M, Teymourian E, Kayvanfar V. Minimising makespan in the two stage assembly hybrid flow shop scheduling problem using artificial immune systems[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(4): 963 – 983.
- [10] Jun S, Park J. A hybrid genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem with nighttime work and simultaneous work constraints: A case study from the transformer industry[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(15/16): 6196 – 6204.
- [11] Liu S F, Wang P F, Zhang J C. An improved biogeography-based optimization algorithm for blocking flow shop scheduling problem[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27(2): 351 – 358.
- [12] Murata T, Ishibuchi H, Tanaka H. Genetic algorithms for flowshop scheduling problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(4): 1061 – 1071.
- [13] Zhao F Q, Qin S, Yang G Q, et al. A factorial based particle swarm optimization with a population adaptation mechanism for the no-wait flow shop scheduling problem with the makespan objective[J]. Expert Systems with Ap-

plications, 2019, 126: 41 – 53.

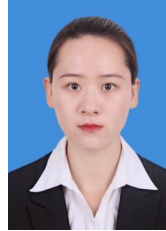
- [14] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46 – 61.
- [15] Zhang S, Zhou Y Q. Grey wolf optimizer with ranking-based mutation operator for IIR model identification[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2018, 27(5): 1071 – 1079.
- [16] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 一种改进的灰狼优化算法 [J]. *电子学报*, 2019, 47(1): 169 – 175.
Long W, Cai S H, Jiao J J, et al. An improved grey wolf optimization algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(1): 169 – 175. (in Chinese)
- [17] Komaki G M, Kayvanfar V. Grey Wolf Optimizer algorithm for the two-stage assembly flow shop scheduling problem with release time[J]. *Journal of Computational Science*, 2015, 8: 109 – 120.
- [18] Faris H, Aljarah I, Al-Betar M A, et al. Grey wolf optimizer: A review of recent variants and applications[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(2): 413 – 435.
- [19] Gupta J N D. Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1988, 39(4): 359 – 364.
- [20] 卢超. 加工时间可控的多目标车间调度问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Lu C. Study on theory and method of multi-objective scheduling problems with controllable processing times [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [21] Liaw C F, Lin Y K, Cheng C Y, et al. Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness [J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(12): 1777 – 1789.
- [22] Hariri A M A, Potts C N. A branch and bound algorithm for the two-stage assembly scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 103(3): 547 – 556.

作者简介



孟荣华 女, 1983年出生, 山东昌乐人. 硕士生导师, 主要从事复杂制造系统优化、先进制造系统建模与调度优化等方面的研究.

E-mail: 89324438@qq.com



孙艾文 女, 1997年出生, 陕西咸阳人. 硕士研究生, 主要从事车间智能调度及其算法方面的研究.

E-mail: 2653084825@qq.com



吴正佳(通信作者) 男, 1964年3月出生, 湖北黄梅人. 教授, 硕士生导师, 主要从事车间生产资源优化配置与作业优化调度等方面的研究.

E-mail: zjwu@ctgu.edu.cn



朱颖颖 女, 1996年出生, 湖北大悟人. 硕士研究生, 主要从事车间智能调度及其算法方面的研究.

E-mail: 1422613062@qq.com



陈保家 男, 1977年出生, 湖北大悟人. 教授, 博士生导师, 主要从事机械设备可靠性评估、智能算法设计等方面的研究.

E-mail: cbjia@163.com



张彪 男, 1990年出生, 山东阳谷人. 主要从事机器学习、智能优化、车间调度等方面的研究.

E-mail: zhangbiao1218@gmail.com



饶运清 男, 1968年4月出生, 湖北赤壁人. 教授, 博士生导师, 主要从事智能优化与智能制造、先进制造系统建模与优化等方面的研究.

E-mail: ryq@hust.edu.cn