

节能技术

基于遗传算法的航空航天环锻件混合流水车间调度优化

李先¹, 张振¹, 周玉龙¹, 陈杰¹, 周永松²

(1. 中国机械总院集团江苏分院有限公司, 江苏 常州 213100; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083)

摘要: 航空航天环锻件的生产特点趋于批量小、定制化和种类多, 针对其生产过程中的混合流水车间调度问题进行了优化研究。将优化目标函数设为最小化的整体完工时间, 选择搜索能力较高的遗传算法, 在 Matlab2019b 软件中模拟仿真实验, 并将实验结果与环锻件的实际生产数据进行对比, 验证了算法的有效性和可行性。结果表明: 提出的基于遗传算法的调度优化方法的整体完工时间, 相较于传统人工排产的略有减少, 约提高生产效率 10.09%, 为优化航空航天环锻件混合流水车间调度问题提供了可能。

关键词: 环锻件; 混合流水车间调度; 遗传算法; 生产效率; 智能管控

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.027

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 11-0196-08

Scheduling optimization on hybrid flow workshop for aerospace ring forgings based on genetic algorithm

Li Xian¹, Zhang Zhen¹, Zhou Yulong¹, Chen Jie¹, Zhou Yongsong²

(1. Jiangsu Institute, China Academy of Machinery Science & Technology Co., Ltd., Changzhou 213100, China;

2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The production characteristics of aerospace ring forgings tend to be small batch, customized and diverse. Therefore, the hybrid flow workshop scheduling problem in the production process was optimized and researched. Then, the optimization objective function was set to minimize the overall completion time, the genetic algorithm with higher search ability was selected, the simulation experiment was conducted in software Matlab2019b, and the experimental results were compared with the actual production data of ring forgings to verify the effectiveness and feasibility of the algorithm. The results show that the proposed scheduling optimization method based on genetic algorithm slightly reduces the overall completion time compared with the traditional manual production scheduling, and improves the production efficiency by about 10.09%, which provides a possibility to optimize the scheduling problem of hybrid flow workshop for aerospace ring forgings.

Key words: ring forgings; hybrid flow workshop scheduling; genetic algorithms; production efficiency; intelligent control

航空航天环锻件的生产早已经具有个性化生产的特点, 这也对传统的生产模式提出了考验。大力发展智能制造是解决当前航空航天环锻件个性化生产需求和智能工厂车间的生产调度问题的有效手段。遗传算法是模拟自然界生物繁衍生息和自然选择所产生的算法, 具有优秀的探索性能以及自适应优化等优点, 在调度领域被广泛应用。本文利用该算法解决多品种、变批量的航空航天环锻件生产的混合流水车间调度问题, 选取最小化的整体完工时间为

优化目标函数^[1], 以提高环锻件生产车间的生产效率和设备利用率; 并提供优质调度方案, 在一定范围内解决航空航天环锻件个性化生产和高效生产之间的矛盾。

1 环锻件生产及遗传算法研究现状

1.1 环锻件生产研究现状

锻件是指对金属坯料进行锻造变形后得到的工件。环锻件是锻件的一种, 是通过碾环将外力施加给金属坯料后, 坯料经过塑性变形形成的具有合适压缩力的环形锻件。环锻件工艺包括锻造、冲孔、环轧、机加工以及热处理等, 如图 1 所示^[2]。

随着环锻件领域的发展, 环锻件种类迅速增多, 体积也趋于大型化^[2], 逐步满足我国各行业的发展

收稿日期: 2023-04-08; 修订日期: 2023-07-08

基金项目: 国家科技重大专项 (2019YFB1704504)

作者简介: 李先 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1282929693@qq.com

通信作者: 张振 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 88013151@qq.com

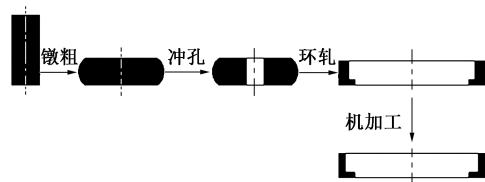


图 1 传统环锻件工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of traditional ring forgings process

需求。2021 年, 孙传华等^[3]提出了一种异形截面环锻件的锻造工艺, 提升了环锻件的性能和技术水平, 满足了当前市场的需求。2019 年, 张志勇等^[4]针对大直径环锻件整体成形难的问题研究了一种旋压扩孔成形理论, 经过生产流程以及工艺参数的确定, 成功整体生产出大直径盘型环锻件。同年中科院金属研究所与山东伊莱特重工股份有限公司成功研制出常温状态下直径为 $\Phi 15.6$ m 的整体锻造不锈钢环形锻件, 促进了我国超大型分段式筒型装备的制造水平的提升, 解决了我国多领域重大装备制造“卡脖子”的问题^[5]。2018 年, 杨广林等^[6]提出了一种对 20 钢环锻件脆断原因的检测方法, 通过化学成分分析和金相检验等多种方式证实了是由于环锻件内部的氢含量较高导致产生白点, 为解决该问题提供了基础, 指明了方向。2017 年, 夏冬冬等^[7]针对大型环锻件频繁出现白点的问题, 展开实验分析, 探伤取样后从原材料、加工工艺、锻后冷却速度和钢水纯净度多个方面对白点成因展开研究, 最终得出结论并总结出减少大型环锻件出现白点概率的措施, 极大地提高了企业的大型环锻件的出厂合格率。2016 年, 张旭东等^[8]研制出一种可用于超高转数电动机的环形锻件, 该环锻件技术指标高、制作难度大, 经过对工艺的改造、添加冷变形强化流程以及特定的消除应力步骤后, 最终成功通过该电动机厂家的检测要求, 促进了我国特种环锻件生产的发展。

环锻件生产逐渐向智能化、大直径化和截面复杂化方向发展。随着我国航空航天以及各类高科技领域的发展, 伴随国家提出的绿水青山的发展需求, 环锻件的生产会逐渐走向低能耗和高效率模式。

1.2 遗传算法研究现状

遗传算法是模仿自然界中生物体进化得出的算法, 1969 年由美国的 John Holland 教授提出, 经过后人总结归纳形成的^[9]。它具有模拟自然界遗传机制和生物进化论的基本思想, 生物学基础扎实。它可以解决的实际问题包含各个种类, 包括但不限于工程设计、计算机应用、自动控制、社科管理和模

式识别等领域, 非常适合解决繁杂的多线性问题以及多维空间择优问题。遗传算法的执行过程包括初始化、个体评价、种群进化和中止检验。且遗传算法具有许多特点: (1) 智能化程度高, 能够实现自组织自适应, 具有很强的鲁棒性; (2) 处理的对象不是问题参数本身, 而是参数编码集; (3) 搜索过程中不会受到优化函数连续性的约束, 且不需要优化函数可导; (4) 可并行运算, 方便使用, 有利于降低设备成本。

随着遗传算法应用领域的逐渐扩大和日渐繁杂的实际问题, 传统遗传算法开始暴露出各种不足和缺点, 在此情景下各种被改进的遗传算法相继问世, 用来解决各种各样的复杂问题^[10]。2021 年, 姬云云等^[11]将遗传算法与 BP 神经网络相结合, 解决了羊肉汤样品感官评分低的问题, 将香辛料的添加量作为遗传算子, 得出百里香、花椒和生姜的最佳添加比例, 并且能够实现通过香辛料配比预测羊肉汤感官风味评分的功能。同年, 冯建鑫等^[12]基于传统量子遗传算法提出了一种改进量子遗传算法, 该算法在多个方面对传统遗传算法进行升级改造, 针对超声电机时变性和非线性特点, 优化了控制器的参数, 并设计了模糊 PID 控制器。相较于传统的自整定 PID 控制器来说, 从动态和稳态两个方面大幅提高了超声电机系统的性能。2022 年, 李艳生等^[13]为了使仓储机器人的拣选路径更为节能, 在传统遗传算法的基础上提出了一种能更好规划仓储机器人路径的人工蜂群-自适应遗传算法。该算法选取机器人运行能耗、转弯次数和路径长度作为适应度函数的评价指标, 并设计出基于三角函数的交叉、变异算子, 使其具有自适应策略调整功能。实验表明, 改进的人工蜂群-自适应遗传算法相较于传统遗传算法规划出的仓储机器人拣选路径更平滑, 且机器人运行能耗降低了 7.64%, 路径长度减少了 9.08%, 更有利于仓储机器人的长期工作和后期维护。同年, 唐俊林等^[14]针对防空火力的任务分配问题提出了一种性能更加卓越的链式多种群遗传算法。该算法在传统遗传算法中加入 CMPGA 算法来加速求解中等规模的防空火力任务分配, 减轻计算任务。改进后的遗传算法充分利用了遗传算法多种群状态下能够并行搜索的特点, 加快了收敛速度, 更有利于种群多样性的维持, 以免出现局部极值。相较于几种典型的防空火力任务分配算法, 改进后的遗传算法结合 CMPGA 算法能够在同等时间内更有效地搜寻到最优解, 验证了该算法的优越性。

遗传算法为复杂系统优化提供了新思路,是一种非确定性的拟自然算法,优化效果十分显著。尽管它存在的问题十分明显,与优化技术的融合尚有欠缺、并行化研究不足,但其在众多领域的表现均十分出色,具有非常广泛的应用价值,应该在现有基础上扩充遗传算法的应用范围,探索更多的改进方法和发展。

2 航空航天环锻件混合流水车间调度问题

2.1 问题描述

航空航天环锻件的混合流水车间调度问题可以归纳为 n 个具有相同加工路径的待加工工件经过 m 道工序加工,有大于等于一个加工工序的并行机器数量在两台及两台以上,且并行机器的加

工处理性能需相同。混合流水车间的布局如图 2 所示。

已知所有工件的加工时间,该问题的目的即设定 n 个工件在每一道工序加工的前后顺序以及在该工序的设备如何分配,从而得到所有工件整体完工时间的最小值。该问题模型的假设如下:

- (1) 同一个工件同一时间只能在一台设备上加工;
- (2) 同一台设备同一时间只能加工一个工件;
- (3) 每个工件在设备上的加工时间已知;
- (4) 加工开始后不得中断;
- (5) 同一工件的工序之间存在先后约束关系,不同工件的工序之间无任何约束关系;
- (6) 忽略设备故障等意外因素;
- (7) 忽略同一台设备上因切换加工工件产生的额外时长。

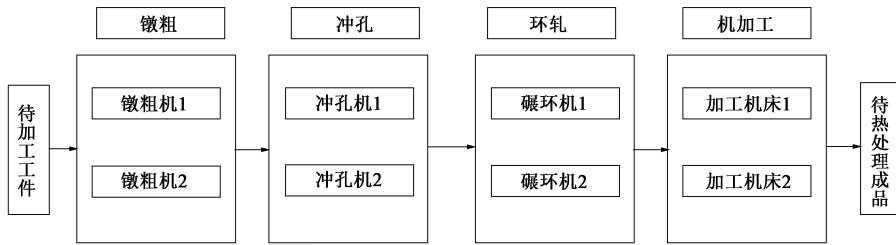


图 2 航空航天环锻件混合流水车间布局图

Fig. 2 Layout diagram of hybrid flow workshop for aerospace ring forgings

主要参数包括:工序数 m ; 工序序号 $i, i=1, 2, \dots, m$; 工件数 n ; 工件序号 $j, j=1, 2, \dots, n$; 工序 i 中的并行设备数 B_i ; 设备序号 $q, q=1, 2, \dots, B_i$; 工件 j 在工序 i 中加工所需时间 T_{ji} ; 工件 j 在工序 i 中加工的开始时间 S_{ji} ; 工件 j 在工序 i 中加工的完成时间 F_{ji} ; 全部工件的整体完工时间 T_{\max} 。

决策变量包括:

(1) X_{qji} : 工件 j 能否在工序 i 的机器 q 上加工, 当 $X_{qji}=1$ 时, 表示可以加工; 当 $X_{qji}=0$ 时, 表示不能加工。

(2) $Y_{j_1 j_2}$: 工件 j_1 和 j_2 在工序 i 中加工的优先性, 当 $Y_{j_1 j_2}=1$ 时, j_1 优先; 当 $Y_{j_1 j_2}=0$ 时, j_2 优先。

并且设定整个生产任务的开始时间为 0, C 为大量常数。

2.2 模型建立

根据环锻件生产车间内的实际调度状况, 为每道工序中的每个工件匹配相对应的设备并确定它开始加工的时间, 从而寻求最小的整体完工时间。以下是以最小化整体完工时间为目标的混合流水车间

调度模型:

$$\min T_{\max} \quad (1)$$

$$T_{\max} = \max F_{ji} \quad (2)$$

$$F_{ji} = S_{ji} + T_{ji} \quad (3)$$

$$\sum_{q=1}^{B_i} X_{qji} = 1 \quad (4)$$

$$S_{j(i+1)} - S_{ji} \geq T_{ji} \quad (5)$$

$$Y_{j_1 j_2} + Y_{j_2 j_1} \geq 1 (j_1, j_2 = 1, \dots, n; j_1 \neq j_2) \quad (6)$$

$$S_{j_1 i} - F_{j_2 i} + C \times (3 - Y_{j_1 j_2} - X_{j_1 q i} - X_{j_2 q i}) \geq 0 \quad (7)$$

式 (1) 表示最小化的整体完工时间; 式 (2) 表示全体工件的整体完工时间, 即在各种可能性中工件 j 在工序 i 的完工时间集合中的最大值; 式 (3) 表示任一工件在任一工序内的加工时间; 式 (4) 表示任一工序内的任一工件只由该工序内的一台设备加工; 式 (5) 表示任一工件进入下一道工序前需要完成本道工序的加工; 式 (6) 以及式 (7) 联合后表示任一工序内的任一设备不能同一时间加工超过一个工件。其中, $X_{qji}, Y_{j_1 j_2} \in \{0, 1\}$ 。

3 算法设计

3.1 算法原理及流程图

遗传算法的遗传方式包括变异、交叉、选择等。算法流程图如图 3 所示。

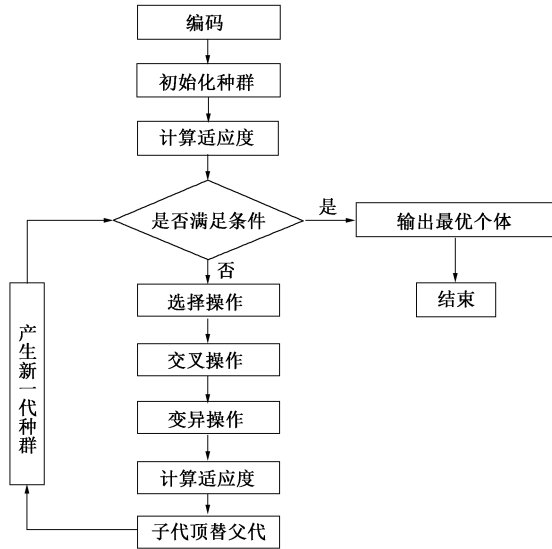


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

3.2 染色体编码

2.1 节已经假设工件存在 n 个, 且每个工件需要的工序为 m 道, 第 i 道工序中的并行设备数为 B_i 。所以现建立下列 $m \times n$ 的编码矩阵 $A_{m \times n}$:

$$A_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

上述矩阵中, 行代表每道工序, 列代表每个不同的工件, 染色体基因 a_{ij} 携带信息为工件 j 在工序 i 中被哪一台设备加工。将 a_{ij} 设定为非整数, 令其包含整数和小数两个部分, 由工件 j 在工序 i 中所用加工设备的序号构成整数部分, 由整数部分所表示的工件在该工序的指定设备上的优先级构成小数部分, 小数部分越小表示优先级越高。由以上编码矩阵衍生出遗传算法染色体: 该染色体存在 m 段, 代表不同的工序, 使用标识符号“0”分隔每段染色体, 且每段染色体存在的基因数为 n , 代表不同的工件, 所以得到染色体的长度为 $m \times (n-1)$ 。染色体可表示为:

$$[a_{11}, a_{12}, \cdots, a_{1n}, 0, a_{21}, a_{22}, \cdots, a_{2n}, 0, \cdots, a_{m1}, a_{m2}, \cdots, a_{mn}] \quad (9)$$

3.3 初始化种群及确定适应度函数

本文产生初始解的方法选用遗传算法中最常见的生成随机数法。在本次航空航天环锻件车间调度模型中的目标函数是求解全体工件完工时的整体完工时间。所以选取全部工件的整体完工时间 T_{\max} 的倒数作为适应度函数, 即适应度函数 $F = 1/T_{\max}$ 。

3.4 确定遗传操作

3.4.1 选择操作

本文的选择操作采取轮盘赌选择法, 该方法是最常见也是最简单的选择方式, 即在种群中的个体被选中的概率大小取决于其自身适应度, 适应度越大, 选中的比例也就越大。此方法有助于保存优良个体, 能够提高算法全局搜索机能, 避免出现类似于贪心算法得到的局部最优解。

3.4.2 交叉操作

先根据实际情况设定合理的交叉概率。依靠交叉概率在种群中随机选择两名个体, 规定其为父代个体, 并在其染色体上分别随机选择一个基因位置, 互换二者所选位置的基因, 再根据父代原有基因顺序对交叉所遗失的基因进行填补。具体操作可见下列实例。

随机选择两名个体作为父代 A 和 B :

$$A = [1.1, 1.3, 1.7, 0, 1.2, 2.2, 2.6, 0, 2.1, 2.3, 1.8]$$

$$B = [2.3, 1.1, 1.6, 0, 1.9, 2.7, 1.5, 0, 2.9, 1.2, 2.5]$$

在其染色体上分别随机选择一个基因位置进行交叉操作, 得到个体 A_1 和 B_1 :

$$A_1 = [*, *, *, 0, 1.9, 2.7, 1.5, 0, *, *, *]$$

$$B_1 = [*, *, *, 0, 1.2, 2.2, 2.6, 0, *, *, *]$$

对遗失的空位进行填补后得到子代个体 A' 和 B' :

$$A' = [1.3, 1.7, 1.2, 0, 1.9, 2.7, 1.5, 0, 2.2, 2.6, 2.1]$$

$$B' = [1.1, 1.6, 1.9, 0, 1.2, 2.2, 2.6, 0, 2.7, 1.5, 2.9]$$

3.4.3 变异操作

本文采取染色体单点基因互换作为变异手段, 可以防止基因丢失, 并且可以对算法的收敛进行优化, 防止其收敛过早无法得到最优解。具体操作见下列所举实例。

随机选定的父代染色体为:

$$A = [1.1, 1.3, 1.7, 0, 1.2, 2.2, 2.6, 0, 2.1, 2.3, 1.8]$$

随机生成两个正整数作为单点基因互换位置,

$r_1=2, r_2=8, r_1$ 和 r_2 为随机函数生成的两个正整数, 代表基因变异时两个单点基因在染色体上互相交换的具体位置, 互换基因得出子代染色体:

$$A' = [1.1, 2.3, 1.7, 0, 1.2, 2.2, 2.6, 0, 2.1, 1.3, 1.8]$$

4 实验结果与分析

本文以项目内合作公司的某一批环锻件产品订单为例, 截取 3 组加工至热处理阶段前的工件, 每组 10 个工件均需要镟粗、冲孔、环轧、机加工 4 道工序, 镟粗工序由两台加工性能相同的镟粗机负责, 冲孔工序由两台加工性能相同的冲孔机负责, 环轧工序由两台加工性能相同的碾环机负责, 机加工工序由两台加工性能相同的加工机床负责。3 组各工件在不同工序所需的加工时间见表 1~表 3, 求解 10 个工件在不同工序的加工顺序。

表 1 第 1 组各工件在不同工序中加工所用时间 (s)
Table 1 Processing time of each workpiece in the first group under different processes (s)

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	142.2	142.2	54.3	54.3	34.2	34.2	120.0	120.0
2	142.2	142.2	46.2	46.2	52.1	52.1	120.0	120.0
3	142.2	142.2	39.3	39.3	61.3	61.3	120.0	120.0
4	142.2	142.2	49.8	49.8	39.8	39.8	120.0	120.0
5	142.2	142.2	31.1	31.1	46.8	46.8	120.0	120.0
6	142.2	142.2	62.3	62.3	97.1	97.1	120.0	120.0
7	142.2	142.2	55.7	55.7	65.9	65.9	120.0	120.0
8	142.2	142.2	115.2	115.2	83.2	83.2	120.0	120.0
9	142.2	142.2	86.4	86.4	46.3	46.3	120.0	120.0
10	142.2	142.2	52.9	52.9	29.9	29.9	120.0	120.0

由 Matlab 编写以上所述遗传算法的程序, 并根据前人经验选取参数:

(1) 种群的规模要合理选择。过小会导致求解不稳定且精确度差, 过大则会导致处理性能降低, 程序运行负载过大, 运行时间长, 所以种群规模一般选择 20~100。

(2) 迭代次数要适中。迭代次数过小种群未成熟, 算法难以收敛; 迭代次数过大会浪费计算资源, 所以一般取迭代次数为 100~500。

(3) 交叉概率要适当。太小会难以有效地对种群进行更新; 太大则会丢失优秀个体, 风险高, 所以一般选择为 0.35~0.80。

表 2 第 2 组各工件在不同工序中加工所用时间 (s)
Table 2 Processing time of each workpiece in the second group under different processes (s)

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	135.0	135.0	62.3	62.3	66.8	66.8	120.0	120.0
2	135.0	135.0	53.2	53.2	36.7	36.7	120.0	120.0
3	135.0	135.0	70.5	70.5	65.5	65.5	120.0	120.0
4	135.0	135.0	35.6	35.6	42.1	42.1	120.0	120.0
5	135.0	135.0	46.8	46.8	55.9	55.9	120.0	120.0
6	135.0	135.0	36.4	36.4	48.3	48.3	120.0	120.0
7	135.0	135.0	95.7	95.7	52.3	52.3	120.0	120.0
8	135.0	135.0	42.5	42.5	97.6	97.6	120.0	120.0
9	135.0	135.0	36.5	36.5	53.9	53.9	120.0	120.0
10	135.0	135.0	95.7	95.7	32.8	32.8	120.0	120.0

表 3 第 3 组各工件在不同工序中加工所用时间 (s)
Table 3 Processing time of each workpiece in the third group under different processes (s)

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	129.9	129.9	77.6	77.6	59.7	59.7	120.0	120.0
2	129.9	129.9	36.6	36.6	46.5	46.5	120.0	120.0
3	129.9	129.9	29.8	29.8	76.6	76.6	120.0	120.0
4	129.9	129.9	56.2	56.2	45.9	45.9	120.0	120.0
5	129.9	129.9	42.3	42.3	62.8	62.8	120.0	120.0
6	129.9	129.9	96.5	96.5	109.6	109.6	120.0	120.0
7	129.9	129.9	45.3	45.3	72.6	72.6	120.0	120.0
8	129.9	129.9	28.8	28.8	42.1	42.1	120.0	120.0
9	129.9	129.9	66.7	66.7	38.4	38.4	120.0	120.0
10	129.9	129.9	49.3	49.3	46.9	46.9	120.0	120.0

(4) 变异概率要合理选择。过小会使种群的多样性受损, 容易丢失有效基因; 过大则会导致算法退化, 有效性下降, 一般选择 0.001~0.100。

综上所述, 本文选取种群规模 $N=20$, 迭代次数 $M=500$, 交叉概率 $p_c=0.5$ 。变异概率 $p_m=0.100$ 。

为保证本次设计的算法有效, 先用第 1 组数据对该算法进行 10 次独立验证, 将验证结果记录在表 4 中。

表 4 第 1 组运行结果 (s)
Table 4 Running results in the first group (s)

计算次数	1	2	3	4	5
整体完工时间	941.5	941.5	942.7	951.2	942.0
计算次数	6	7	8	9	10
整体完工时间	947.1	946.0	941.8	940.6	946.0

表 4 中, 整体完工时间最短的一次进化为第 9

次，所用时间为 940.6 s，其具体的加工顺序以及设备分配如表 5 所示（同时开始加工的步骤顺序并列）。1~40 表示 10 个工件共 40 次作业按加工的开始时间前后的排序结果，比如数字 30 表示在本次的调度计算中，工件 2 是在加工机床 1 上完成了自身的机加工工序环节，并且本次作业在所有作业中调度排序为第 30。

表 5 第 1 组各工件实际加工顺序及设备分配

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	10	—	17	—	—	24	—	25
2	—	10	—	17	23	—	30	—
3	—	26	—	35	37	—	—	39
4	—	17	26	—	—	31	34	—
5	—	1	3	—	7	—	8	—
6	—	3	—	10	—	15	—	21
7	17	—	—	26	32	—	—	33
8	1	—	—	3	—	9	14	—
9	3	—	10	—	16	—	22	—
10	26	—	35	—	—	38	40	—

第 2 组数据也进行 10 次独立验证，将验证结果记录在表 6 中。

表 6 第 2 组运行结果（s）

Table 6 Running results in the second group（s）					
计算次数	1	2	3	4	5
整体完工时间	901.0	893.5	898.0	893.5	894.1
计算次数	6	7	8	9	10
整体完工时间	894.1	901.0	898.0	901.0	897.7

表 6 中，整体完工时间最短的一次进化为第 2 次和第 4 次，所用时间为 893.5 s，其具体的加工顺序以及设备分配如表 7 所示（同时开始加工的步骤顺序并列）。

第 3 组数据也进行 10 次独立验证，将验证结果记录在表 8 中。

表 8 中，整体完工时间最短的一次进化为第 1 次和第 7 次，所用时间均为 930.7 s，其具体的加工顺序以及设备分配如表 9 所示（同时开始加工的步骤顺序并列）。

3 组中每组的最佳优化计算过程的遗传算法进化曲线图依次如图 4、图 5 和图 6 所示，纵坐标表

表 7 第 2 组各工件实际加工顺序及设备分配

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	—	3	9	—	—	15	—	17
2	—	18	27	—	32	—	—	33
3	3	—	—	9	16	—	22	—
4	27	—	—	35	37	—	—	39
5	18	—	—	27	—	31	34	—
6	—	27	35	—	—	37	40	—
7	1	—	—	3	—	8	14	—
8	—	1	3	—	7	—	—	13
9	—	9	—	18	—	23	—	25
10	9	—	18	—	24	—	26	—

表 8 第 3 组运行结果（s）

Table 8 Running results in the third group（s）					
计算次数	1	2	3	4	5
整体完工时间	930.7	936.0	936.0	940.6	936.0
计算次数	6	7	8	9	10
整体完工时间	936.0	930.7	936.0	936.0	936.0

表 9 第 3 组各工件实际加工顺序及设备分配

工件	镟粗		冲孔		环轧		机加工	
	镟粗	镟粗	冲孔	冲孔	碾环	碾环	加工机	加工机
	机 1	机 2	机 1	机 2	机 1	机 2	床 1	床 2
1	18	—	26	—	32	—	—	36
2	9	—	18	—	22	—	25	—
3	—	9	—	18	—	23	—	31
4	—	26	34	—	38	—	39	—
5	—	18	—	26	—	30	33	—
6	1	—	—	3	—	15	—	24
7	—	3	9	—	14	—	17	—
8	3	—	—	9	—	13	—	15
9	—	1	3	—	7	—	8	—
10	26	—	—	34	—	37	—	40

示每次迭代过程中的工件整体完工时间；横坐标表示当前迭代次数。可以得出，目标函数伴随种群遗传进化逐渐降低，进化至一定程度后，基本接近最优结果，开始收敛。

此外，利用 Matlab2019b 软件生成了航空航天环锻件混合流水车间调度甘特图，如图 7、图 8 和图 9 所示，其中，[6 4] 表示第 6 个工件在第 4 道

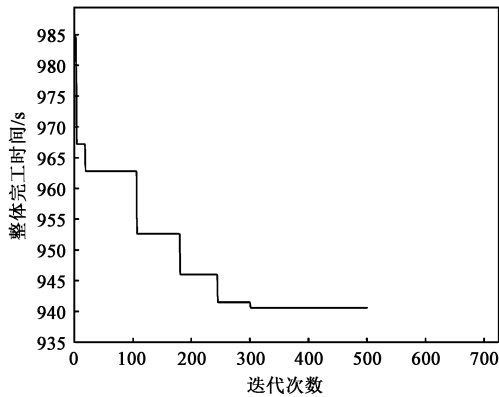


图 4 第 1 组遗传算法进化曲线

Fig. 4 Genetic algorithm evolutionary curve of the first group

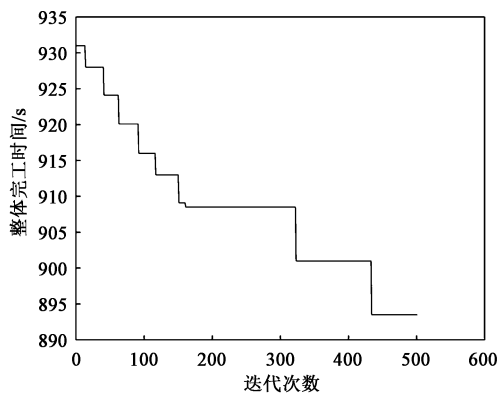


图 5 第 2 组遗传算法进化曲线

Fig. 5 Genetic algorithm evolutionary curve of the second group

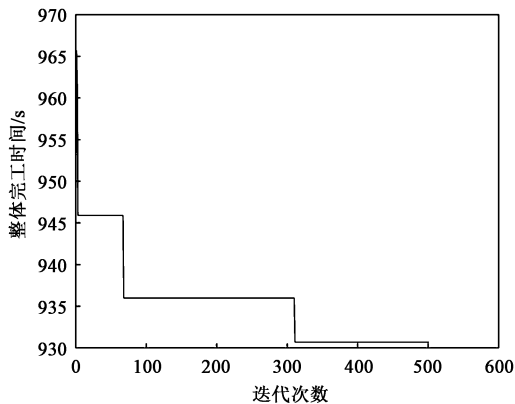


图 6 第 3 组遗传算法进化曲线

Fig. 6 Genetic algorithm evolutionary curve of the third group

工序的加工情况,其左右两侧对应横坐标分别表示加工开始时间和结束时间,对应纵坐标表示在加工机床 2 加工,即加工的设备,其他同理。可以清晰地辨别每组各工件在不同工序的加工顺序以及在任何工序内的设备分配详细情况。

总的来说,车间实际生产过程中,完成本实验中第 1 组 10 个工件的加工需要 1043.7 s,计算后节

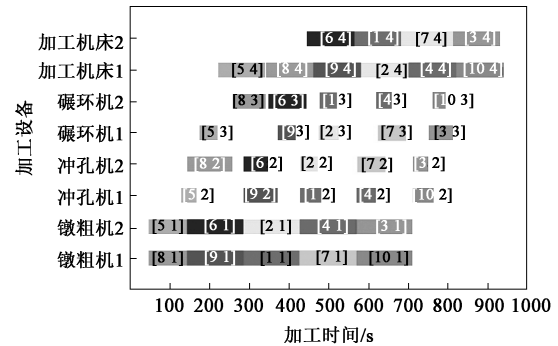


图 7 第 1 组混合流水车间调度甘特图

Fig. 7 Gantt chart of hybrid flow workshop scheduling in the first group

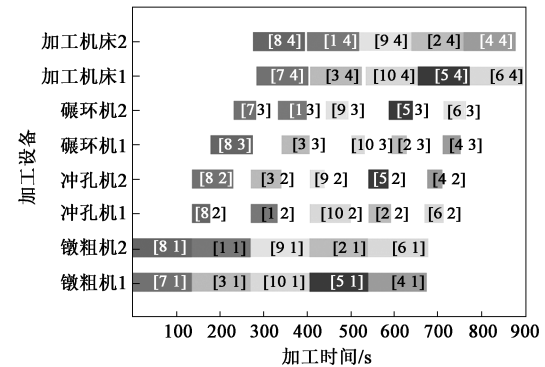


图 8 第 2 组混合流水车间调度甘特图

Fig. 8 Gantt chart of hybrid flow workshop scheduling in the second group

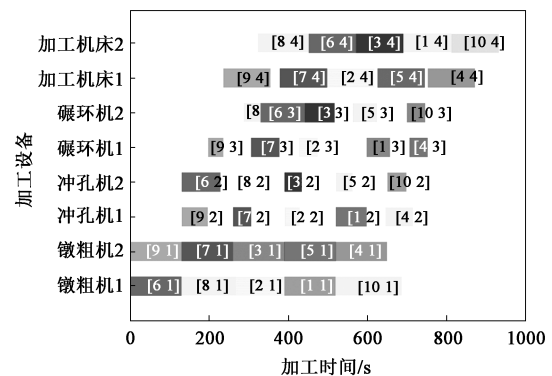


图 9 第 3 组混合流水车间调度甘特图

Fig. 9 Gantt chart of hybrid flow workshop scheduling in the third group

约 103.1 s,缩短了整体完工时间,效率提高了约 9.88%;第 2 组 10 个工件的实际加工需要 1006.5 s,计算后节约了 113.0 s,效率提高约了 11.22%;第 3 组 10 个工件的实际加工需要 1024.8 s,计算后节约了 94.1 s,效率提高了约 9.18%。综合计算,平均每组提高生产效率 10.09%。以上的航空航天环锻件混合流水车间调度问题只针对 3 组共 30 个工件进行了调度计算,在实际生产过程中工件的数量十

分庞大, 不同工序内的设备数也会变化, 但只需要给出需调度工件在不同工序加工所需时间的表格以及各工序设备数的表格, 导入算法后, 即可计算更大数量以及更多设备的航空航天环锻件同类型混合流水车间调度问题, 实现加工过程的优化处理。

5 结语

本文对航空航天环锻件混合流水车间调度问题进行了简要说明、问题描述以及建模处理, 选取遗传算法将目标函数设置为整体完工时间的最小化, 选用轮盘赌、交叉、变异等遗传方式, 对航空航天环锻件的生产调度问题进行了迭代优化并筛选。通过在 Matlab2019b 软件中进行仿真实验, 证明了该遗传算法确实能够提高生产效率, 缩短生产用时, 在航空航天环锻件生产调度领域具有一定的有效性, 并为其他品种锻件在生产过程中提高生产效率、降低生产时间提供了思路。

参考文献:

- [1] 王迅, 陈星艳, 陶涛, 等. 遗传算法在板式定制家具混合流水车间调度中的应用 [J]. 家具与室内装饰, 2022, 29 (11): 1-5.
Wang X, Chen X Y, Tao T, et al. Application of genetic algorithm in hybrid flow shop scheduling of panel customized furniture [J]. Furniture & Interior Design, 2022, 29 (11): 1-5.
- [2] 李兆通, 李亮, 景财年, 等. 大型环锻件轧制研究现状与展望 [J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56 (6): 31-37.
Li Z T, Li L, Jing C N, et al. Current status and prospects of rolling research on large ring forgings [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56 (6): 31-37.
- [3] 孙传华, 刘峰, 胡楠. 航空发动机用 Ti64 异形截面环锻件轧环工艺 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57 (2): 140-141.
Sun C H, Liu F, Hu N. Ring rolling process of Ti64 special section ring forgings for aeroengine [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57 (2): 140-141.
- [4] 张志勇, 郭建, 李春辉, 等. 大直径盘形环锻件整锻成形工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2019, 190 (4): 19-20, 23.
Zhang Z Y, Guo J, Li C H, et al. Research on the integral forging process of disc ring forgings with large diameter [J]. Heavy Casting and Forging, 2019, 190 (4): 19-20, 23.
- [5] 中国轧制世界单体最重、直径最大奥氏体不锈钢环锻件 [J]. 经济导刊, 2019, (4): 8.
China rolls world's single heaviest and largest diameter austenitic stainless steel ring forgings [J]. Economic Herald, 2019, (4): 8.
- [6] 杨广林, 高东升, 康喜英, 等. 20 钢环锻件拉伸试棒脆断原因分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (9): 257-259.
Yang G L, Gao D S, Kang X Y, et al. Reasons analysis on brittle fracture of tensile test bars of 20 steel ring forgings [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (9): 257-259.
- [7] 夏冬冬, 陈斌, 董娟, 等. 大型环锻件白点成因分析及解决办法 [J]. 冶金与材料, 2017, 37 (6): 4, 6.
Xia D D, Chen B, Dong J, et al. Analysis of causes and solutions of white spots on large ring forgings [J]. Metallurgy and Materials, 2017, 37 (6): 4, 6.
- [8] 张旭东, 谢斌, 邹颖, 等. 20MW1Mn18Cr18N 电动机护环锻件制造工艺 [J]. 金属加工: 热加工, 2016, (17): 22-23.
Zhang X D, Xie B, Zou Y, et al. 20MW1Mn18Cr18N motor guard ring forgings manufacturing process [J]. MW Metal Forming, 2016, (17): 22-23.
- [9] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25 (10): 2911-2916.
Ge J K, Qiu Y H, Wu C M, et al. Summary of genetic algorithms research [J]. Application Research of Computers, 2008, 25 (10): 2911-2916.
- [10] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (4): 1201-1206, 1210.
Ma Y J, Yun W X. Research progress of genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (4): 1201-1206, 1210.
- [11] 姬云云, 田洪磊, 詹萍, 等. BP 神经网络结合遗传算法优化羊肉汤中香辛料的添加量 [J]. 中国食品学报, 2021, 21 (3): 128-137.
Ji Y Y, Tian H L, Zhan P, et al. Optimizing of the amount of spices in stewed mutton soup using BP neural network and genetic algorithm [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21 (3): 128-137.
- [12] 冯建鑫, 王强, 王雅雷, 等. 基于改进量子遗传算法的超声电机模糊 PID 控制 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51 (6): 1990-1996.
Feng J X, Wang Q, Wang Y L, et al. Fuzzy PID control of ultrasonic motor based on improved quantum genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2021, 51 (6): 1990-1996.
- [13] 李艳生, 万勇, 张毅, 等. 基于人工蜂群-自适应遗传算法的仓储机器人路径规划 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (4): 282-290.
Li Y S, Wan Y, Zhang Y, et al. Path planning for warehouse robot based on the artificial bee colony-adaptive genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (4): 282-290.
- [14] 唐俊林, 张栋, 王孟阳, 等. 改进链式多种群遗传算法的防空火力任务分配 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (6): 19-27.
Tang J L, Zhang D, Wang M Y, et al. Air defense firepower task assignment based on improved chainlike multi-population genetic algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54 (6): 19-27.