

面向低碳排放的航空零件柔性作业车间调度优化



刘慧¹,徐志涛^{1,2},陈文飞³,胡泽儒⁴

1.南京航空航天大学,江苏 南京 211106

2.智能决策与数字化运营工业和信息化部重点实验室,江苏 南京 211106

3.宁波市特种设备检验研究院,浙江 宁波 315211

4.中国船级社质量认证公司重庆分公司,重庆 400011

摘要:降低航空零部件制造过程中的碳排放是实现航空工业绿色低碳发展的重要途径之一。本文针对航空零件加工多品种、小批量的特点,以及智能制造环境下人机协作的复杂性,以航空零件柔性作业车间为背景,构建了机器在不同工作状态下的能耗计算模型,建立了以最小化最大完工时间、机器总负载和机器能耗为目标的航空零件柔性作业车间多目标调度优化模型。首先,本文设计了4层编码方式以实现机器和人员的合理分配;其次,为解决算法“早熟”问题并提高帕累托解的质量,设计了基于组合邻域搜索的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解;最后,通过具体案例验证了模型和算法的有效性。案例分析表明,通过本文提出的方法,可以在兼顾生产效率和加工成本的同时,实现航空零件加工过程的低碳排放。

关键词:航空零件制造;柔性作业车间调度;人机协作;多目标优化;NSGA-II算法

中图分类号:V268.7

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.02.006

航空零件生产具有单件小批量、多品种典型特征,不同航空零件加工工艺复杂、工艺路线差别较大且标准化程度低,制造车间通常按照设备组工艺特征布置,因而,航空零件制造调度是一种典型的柔性作业车间调度^[1]。随着我国航空工业不断向智能化发展,智能制造装备在航空零件加工中得到了广泛使用^[2],加工组织方式正在从过去的“多人一机”向“一人多机”方式转变,导致人机协作关系更加复杂。与此同时,在全球绿色发展和我国2030年达到碳达峰的战略要求下,低碳发展正成为航空工业的新趋势^[3],如何在智能制造背景下降低航空零件制造过程的碳排放,是我国航空工业发展面临的新课题。

由于航空零件制造过程复杂,在加工过程中需要将各个航空零件合理地分配到机器,并确定零件加工顺序,以实现生产的高效性,因此航空制造调度优化是当前航空制造

管理的热点之一。孙棋棋等^[4]从人员、设备、物料等角度对航空复材生产车间排产与调度问题的技术要素进行识别与关联,构建了航空复材生产车间排产调度算法库以应对复杂制造环境的生产要求。刘辉等^[5]针对航空发动机装配车间调度问题,以装配班组完工时间最小化为目标建立车间调度模型,并运用改进型文化基因算法求解。王晋等^[6]针对航空零件生产调度中多目标和实时性要求,构建了以最小化最大完工时间、生产成本和生产能耗为目标的柔性作业车间动态调度模型,设计了改进匈牙利算法进行求解。吕玉江等^[7]针对航空制造车间物流配送效率低问题,提出以自动导向车(AGV)为主体的智能物流在航空制造车间的重要性,并对AGV路径规划、任务规划和调度问题进行了深入研究。刘震宇等^[8]对航空兵器自动化生产中的智能车调度问题进行了研究,并基于Dijkstra算法对模型进行了

收稿日期: 2023-05-26; 退修日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-23

基金项目: 航空科学基金(2018ZE52057); 江苏高校哲学社会科学研究重大项目(2023SJZD127); 中央高校基本科研业务费专项资金(ND2023006, NJ2023027)

引用格式: Liu Hui, Xu Zhitao, Chen Wenfei, et al. Aerial accessory flexible job shop scheduling optimization considering carbon low emissions [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(02): 47-57. 刘慧, 徐志涛, 陈文飞, 等. 面向低碳排放的航空零件柔性作业车间调度优化[J]. 航空科学技术, 2024, 35(02): 47-57.

求解。娄航宇等^[1]针对航空构件生产中特定工序需要多人协同完成的特点,构建了考虑设备人员的扩展双资源约束柔性作业车间调度模型,并采用了多小组协同教与学优化算法进行求解。

柔性作业车间绿色调度问题作为经典车间调度问题的重要扩展,考虑了每道工序有多台可供选择的机器,且在不同机器上的加工时长存在差异的状况^[9],使问题更加符合实际生产情况,而绿色车间调度作为绿色制造的重要环节,也是国内外学者研究的热点之一^[10]。Yi Xiongfang 等^[11]以制造周期、加工成本、加工质量和能耗为优化目标,构建了考虑机器状态不确定条件下的调度优化模型。李龙等^[12]求解了以车间的生产运作时间、生产成本以及车间能耗为目标的流水车间绿色优化模型。李益兵等^[13]提出了一种基于三维矢量的编码和动态邻域搜索的改进人工蜂群算法,来求解以最小化最大完成时间和环境污染为目标的柔性作业车间调度问题。戴敏等^[14]构建了以最小化完工时间和最小化总能耗为目标的机器和AGV集成优化模型。Dai Min 等^[15]以总能耗和最大完工时间最小为目标,对具有运输约束的柔性作业车间调度进行优化。刘琼等^[16]构建了所有产品制造过程碳足迹总和最短、最长完工时间最短、车间设备利用率最大的多目标优化调度模型。

从文献研究可知,在航空零件制造调度研究方面,尚未检索到面向低碳排放的调度研究;而在柔性作业车间低碳的研究方面,现有文献虽大多以完工时间、能耗或碳排放作为优化目标,但鲜有考虑智能制造环境下复杂人机协作给完工时间、设备负载以及碳排放等带来的影响。

因此,本文以智能制造环境下的航空零件制造柔性作业车间绿色调度为对象,考虑多人多机协作复杂协同情况,以机器能耗、机器总负载以及最大完工时间为优化目标对车间绿色调度问题进行建模。该问题的难点在于不同工人操作的机器是不确定的,在考虑任务分配和工人分配的同时,要考虑分配不同工人数量的设备给生产中加工准备时间带来的影响,完成对机器能耗的评估。考虑到该调度优化问题的特性,本文研究采用邻域搜索对带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行改进,最后通过实例验证模型和算法的有效性。

1 问题描述与数学建模

1.1 问题描述

航空零件柔性作业车间绿色调度问题可以描述为:加工车间内有 P 个工人、 M 台设备和 J 道可加工工序。现有 N 个不

同类型的工单任务待加工,每个工单任务 i ($i=1,2,3,\dots,N$)包含 J_i 道加工工序,且每个工单的加工要求和工艺完全相同。其中,工人皆为熟练员工,都可操作车间内的 M ($M=1,2,\dots,m$)台设备;每道工序有至少一台设备可供选择;不同设备完成同一加工任务的加工时间和能耗不同。机器待机时间包括机器空闲时间和加工准备时间,其中加工准备时间因工单任务指派的设备和设备指派工人数量的不同而产生差异。通过为工序选择合适的设备,为设备选择合适数量的工人,实现最小化最大完工时间、机器总负载以及机器总能耗的目标。

1.2 相关参数、变量及假设说明

1.2.1 参数及变量说明

参数及变量说明见表1。

表1 参数及变量说明

Table 1 Parameters and variables description

N	工单集合, $i = 1, 2, \dots, N $
P	工人集合, $p = 1, 2, \dots, P $
M	机器集合, $m = 1, 2, \dots, M $
M_{ij}	工序 O_{ij} 的可选机器集合
J_i	工单 i 的工序集合, $j = 1, 2, \dots, J_i $
O_{ij}	工单 i 的第 j 道工序
t_{ijm}	工序 O_{ij} 在机器 m 上的加工时间
s_{ijm}	工序 O_{ij} 在机器 m 上的开始加工时间
f_{ijm}	工序 O_{ij} 在机器 m 上的完工时间
tt	各工序的标准加工准备时间
st_m	机器 m 的加工准备时间
wt_{ijm}	机器 m 完成工序 O_{ij} 后的机器空闲时间
λ	单位数量的工人对机器的影响能力
pt_{ijm}	工序 O_{ij} 在机器 m 上的加工功率
pw_m	机器 m 的待机功率
s_m	机器 m 的待机系数
$k_{\max}$	分配到机器上的总人数上限
α	理论加工功率和实际加工功率之间的转换系数,一般取1.15~1.25
x_{ijm}	工序 O_{ij} 在机器 m 上加工,取1;否则,取0
y_{mp}	工人 p 操作机器 m ,取1;否则,取0

1.2.2 假设说明

为了更加准确地对航空零件柔性作业车间绿色调度问题进行数学表达,在调度优化模型的构建中假设同一个工单的工序之间有加工顺序约束,每台设备的操作可以由不多于两个的工人协作完成,且(技术熟练程度可能不同导致)不同工人操作设备时的加工效率不同,以及一台机器可以由多人协同操作,同一个人可以操作多台同类机器。

1.3 调度优化模型

完工时间可以直观反映车间的生产效率,机器总负载

指标能够减少设备的整体损耗和车间的生产成本^[17],机器总能耗指标利于减少设备碳排放,这些都是航空制造企业重点关注的调度目标,基于此构建的航空零件柔性作业车间多目标调度模型如下

$$\min f_1 = \max \{ f_{ijm} | i \in N, j \in J_i, m \in M \} \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in J_i} \sum_{m \in M} t_{ijm} x_{ijm} \quad (2)$$

$$\min f_3 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in J_i} \sum_{m \in M} \alpha \times (pt_{ijm} \times t_{ijm} \times x_{ijm}) + pw_m \times x_{ijm} \times (wt_{ijm} + st_m) \quad (3)$$

s.t.

$$f_{ijm} = s_{ijm} + t_{ijm} \quad (4)$$

$$st_m = tt \times s_m \quad (5)$$

$$1 \leq \sum_{p \in P} y_{mp} \leq k_{\max}, \forall m \in M \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{m=1}^M x_{ijm} = 1 \quad (7)$$

$$f_{i,j,m} \leq s_{i,j+1,m} \quad (8)$$

$$s_m = \begin{cases} 1, p=1 \\ \frac{1}{\lambda + \sum_{p=1}^p y_{mp}}, 2 \leq p \leq k_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式(1)是对完工时间进行优化的函数,以最小化最大完工时间为优化目标;式(2)表示以最小化机器总负载为目标;式(3)表示最小化工单任务生产过程中机器的能耗;式(4)表示生产系统中的机器加工任务的过程连续,即当某个工单的工序在某台机器上的加工任务开始时,其加工过程不能被中断;式(5)表示机器 m 上的工序加工准备时间,其受到工人数量影响;式(6)表示每台机器上的加工人数限制,且机器加工至少需要有一个工人参与;式(7)是资源约束,表示同一时间一个工单的一个工序只能由一台机器加工;式(8)为工单在加工过程中的加工顺序约束;式(9)是等式约束,表示机器上分配不同数量的工人对机器的影响系数。

2 基于NSGA-II的模型求解算法

考虑到NSGA-II算法在求解多目标问题时具有计算效率高、收敛性好等优点,但同时也具有易“早熟”且容易陷入局部收敛的缺点,本文结合邻域搜索算法,设计多种邻域搜索算子以提高种群多样性,改善算法收敛性能。基于组合邻域搜索的NSGA-II算法的主要步骤如图1所示。

2.1 编码与解码

考虑到工序、加工机器选择及工人指派问题的复杂性,

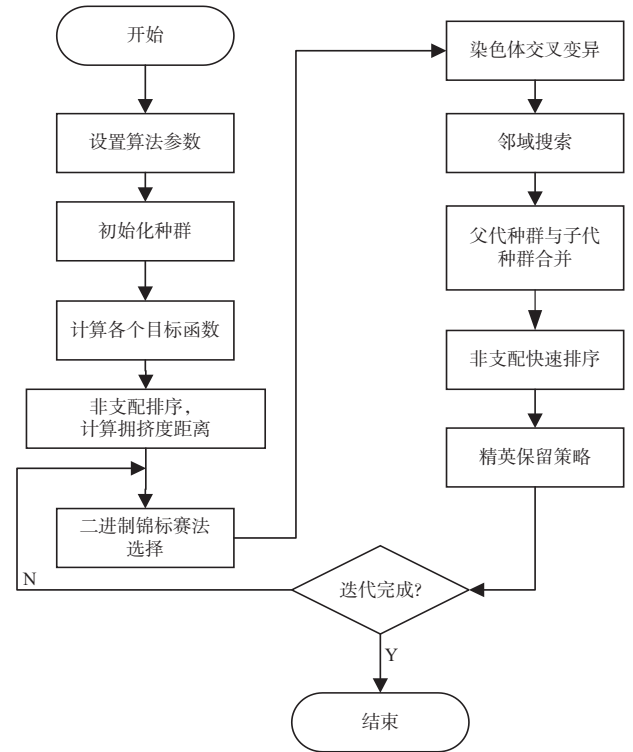


图1 基于组合邻域搜索的NSGA-II算法流程图

Fig.1 Program of the NSGA-II algorithm based on neighborhood search

本文采用4层编码方式,第1层编码为基于工序的实数编码,以数字表示工单号,出现次数为该工单的工序;第2层编码为基于机器的编码,为前段工序选择合适的加工机器,编码长度为工序总数;第3层编码是为机器指派人员优先度的编码,长度为机器数与工人数的乘积,其中又分为工人数量的小层,每一层表示人员分配给机器的一个优先度,数值为[0,1]区间的实数,经过排序后得到排序编码作为人员优先度编码;第4层编码是为机器指派人员数量的编码,数值为[1, $k_{\max}$]内的整数,编码长度为可用的机器总数,第3层和第4层编码合称指派编码。

例如,有3($i=1,2,3$)个工单任务待加工,每个工单有 J_i 个工序($J_1=2, J_2=2, J_3=3$)。同时,共有3台机器可供使用;车间内有 $P=3$ ($p=1,2,3$)个工人, $k_{\max}=2$ 。编码的具体步骤如下。

(1) 基于工序和机器的编码

如图2所示,工序编码第1位表示工单2的第1道工序,编码第2位表示工单1的第1道工序;机器编码段第2位表示工序 O_{11} 的加工机器为其可选机器集的第1个机器,即1号机器,第5位表示工序 O_{22} 的加工机器为其可选机器集的第2个机器,即3号机器,以此类推,可得工序顺序和指派

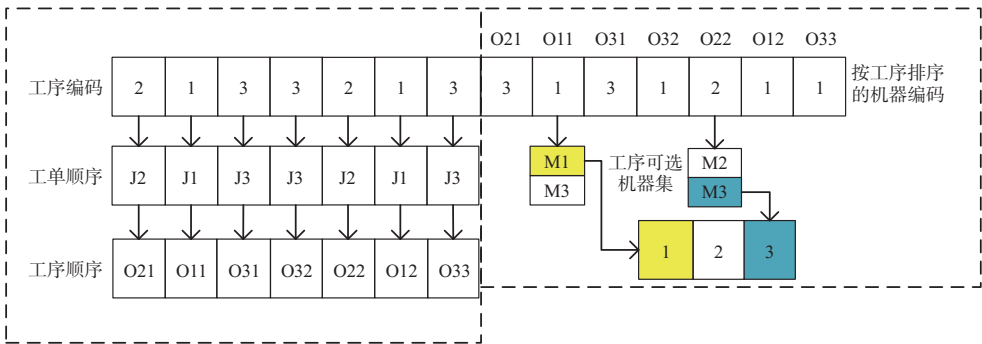


图2 工序编码和机器编码示意图

Fig.2 Coding for process and machine code

机器。

(2) 为机器指派人员的优先度编码

在该层编码中,基因的取值范围为[0,1],且长度为机器数与工人数的乘积。设第3层编码如图3所示。

0.98	0.56	0.34	0.20	0.66	0.61	0.16	0.29	0.65
------	------	------	------	------	------	------	------	------

图3 机器指派人员优先度编码

Fig.3 Coding for priority in workforce assignment

将图3中的编码转换为 $M \times P$ 矩阵,可以得到如表2所示的矩阵,其中, M 表示机器数量, P 表示工人数量。对表2中每行数值分别进行排序,由此得出每台机器对应的工人指派优先度矩阵表,见表3。表3中第一行[3,2,1]表示,在机器1的工人指派中,优先选择工人3,其次是工人2,最后是工人1;以此类推,可得各机器的工人指派优先度。

(3) 为机器指派人员数量编码

由指派人员数量为 $[1, k_{\max}]$ 内的整数,可得每台机器上指派人员数量,如图4所示。

2	2	1
---	---	---

图4 机器指派人员数量编码

Fig.4 Coding for the number of workforce assigned to a machine

2.2 快速非支配排序和拥挤度距离计算

计算种群中每个个体的被支配个数和该个体支配的集合,并划分种群中每个个体的帕累托等级;为保证种群多样性,引入了拥挤度距离,对处于同一帕累托等级上的个体,计算每个个体与相邻两个个体的目标的函数值的差值,对差值取绝对值并求和,得出该个体的拥挤度距离。拥挤度距离越大,表明其周围的个体数量越少,个体的密度越稀疏,而个体也就越优。

2.3 二进制锦标赛选择

采用二进制锦标赛选择法,每次从种群中随机选择两个个体,优先选择排序等级低的个体;若排序等级一样,则优先选择拥挤度大的个体,生成 $\text{popsize}/2$ 个个体的种群。重复该过程,将两次生成的种群合并成为新的子代种群(种群规模为 popsize)。

2.4 交叉变异

对二进制锦标赛选择生成的种群进行交叉和变异操作。本文采用4点交叉和多点变异操作,具体步骤为:首先,随机选择两个染色体作为父代;其次,在工序编码中随机产生两个交叉点 l_1 和 l_2 ($l_1 < l_2$),在对方父代中消去交叉部分的元素值,将剩余元素值按原顺序排列,然后将交叉部分

表2 $M \times P$ 矩阵表

Table 2 $M \times P$ matrix

M	P		
	0.98	0.56	0.34
	0.20	0.66	0.61
	0.16	0.29	0.65

表3 工人指派优先度矩阵表

Table 3 Matrix for workforce assignment priority

	工人1	工人2	工人3
机器1	3	2	1
机器2	1	3	2
机器3	1	2	3

补在交叉位置,并改变相应位置的机器编码,随机选择 r_1 位置工序插入 r_2 位置以进行变异操作;最后,在指派编码中产生两个交叉点 k_1 和 k_2 ($k_1 < k_2$),将两父代染色体上 $k_1 \sim k_2$ 的基因片段进行交换,并随机选择 r 个变异位置,对该位置的基因值进行随机变异,最终产生符合编码规则的子代染色体,具体的交叉操作如图5所示。

2.5 邻域搜索

为增加种群多样性,本文设计了工序交换算子、工序插入算子和机器变异算子,以提高算法局部搜索能力。

(1) 工序交换算子

在工序编码中随机选择 r_1 和 r_2 位置的工序并交换,相应地调整机器编码段;在指派编码中随机选择 r 个位置,并对该位置的基因值进行随机变异,以产生符合编码规则的子代染色体,如图6所示。

(2) 工序插入算子

在工序编码中随机选择 r_1 位置的工序取出并插入一个随机的位置 r_2 中,相应地调整机器编码段;在指派编码中随机选择 r 个位置,并对该位置的基因值进行随机变异,以产生符合编码规则的子代染色体,如图7所示。

(3) 机器变异算子

机器编码中随机选择 r 个位置,并对该位置的机器编码基因值进行随机变异,以产生符合编码规则的子代染色体;在指派编码中随机选择 r 个位置,并对该位置的基因值进行随机变异,以产生符合编码规则的子代染色体,如图8所示。

2.6 精英保留策略

为避免重复个体对种群多样性产生影响,降低算法效率,对传统NSGA-II算法中的精英保留策略进行改进,将种群规模为popsize的父代种群和子代种群合并形成规模大

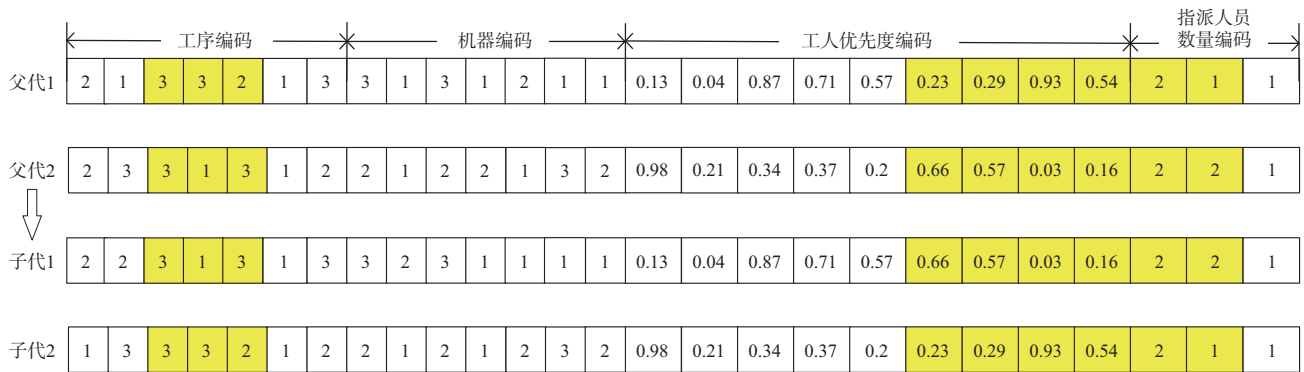


图5 交叉示意图

Fig.5 Example of cross operator

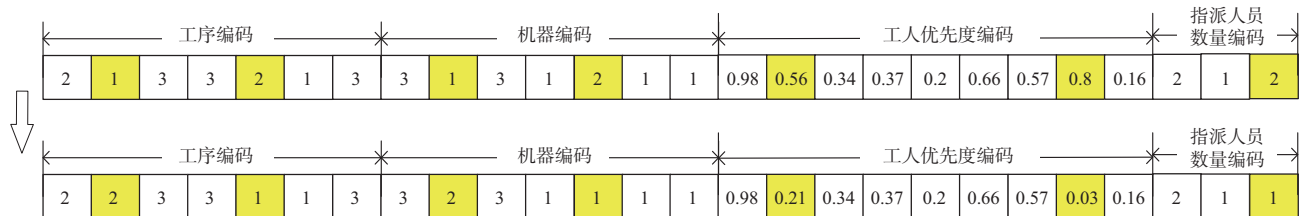


图6 工序交换示意图

Fig.6 Example of swap operator

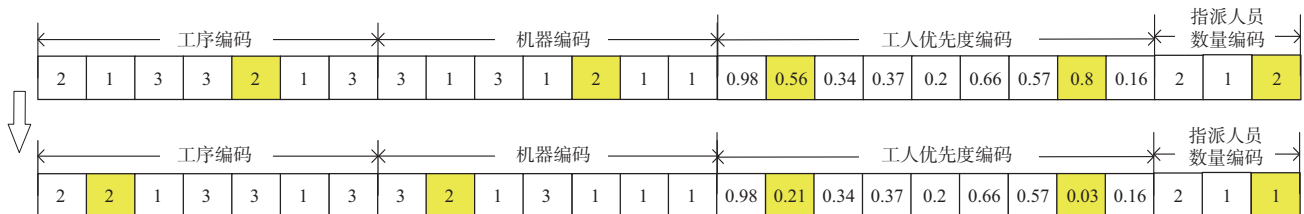


图7 工序插入示意图

Fig.7 Example of insert operator

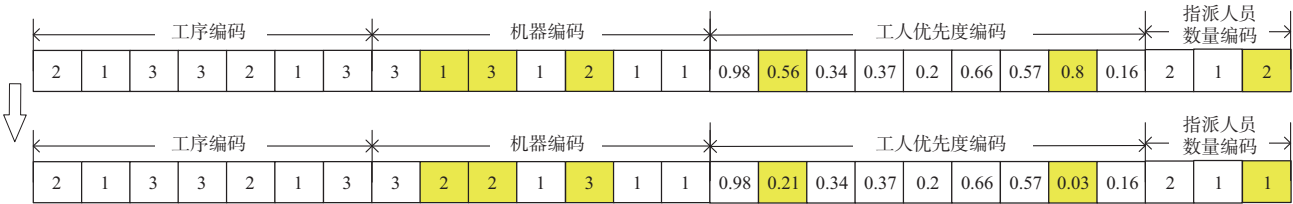


图8 机器变异示意图

Fig.8 Example of mutation operator

表4 原始数据表

Table 4 Raw data sheet

工单任务 <i>i</i>	工序 <i>J_i</i>	设备 <i>M</i>							
		<i>M</i> =1	<i>M</i> =2	<i>M</i> =3	<i>M</i> =4	<i>M</i> =5	<i>M</i> =6	<i>M</i> =7	<i>M</i> =8
<i>i</i> =1	<i>J</i> =1	1.73/36.50	—	1.39/47.25	—	—	1.78/27.00	—	2/36.50
	<i>J</i> =2	1.26/35.00	—	1.68/39.50	2.62/17.00	—	—	1.71/43.00	—
	<i>J</i> =3	—	1.91/27.50	—	—	1.26/35.45	—	—	2.13/24.00
	<i>J</i> =4	—	2.65/46.30	—	—	—	1.6/56.40	—	—
	<i>J</i> =5	—	1.44/37.00	—	—	1.26/33.50	—	—	1.21/40.95
	<i>J</i> =6	—	—	—	2.87/24.00	1.22/36.00	—	1.8/26.40	—
<i>i</i> =2	<i>J</i> =1	—	2.85/23.00	—	2.42/34.50	—	1.21/26.50	1.54/38.50	—
	<i>J</i> =2	1.21/42.00	2.42/17.00	—	—	—	2.42/23.00	—	—
	<i>J</i> =3	1.87/30.00	—	—	1.69/36.75	—	—	1.68/24.40	—
	<i>J</i> =4	2.36/16.00	—	—	1.67/26.50	—	—	1.78/30.00	1.43/36.00
	<i>J</i> =5	0.97/44.00	—	—	2.29/28.00	—	1.87/34.00	—	—
	<i>J</i> =6	1.66/32.50	—	0.98/44.50	—	—	2.65/30.15	—	—
<i>i</i> =3	<i>J</i> =1	—	2.92/22.60	1.53/42.25	—	1.89/28.95	—	—	2.01/39.50
	<i>J</i> =2	1.11/34.25	—	—	2.78/21.00	1.89/35.5	—	1.37/41.50	—
	<i>J</i> =3	—	1.77/37.00	—	—	—	2.23/25.95	—	—
	<i>J</i> =4	—	—	1.93/27.00	—	1.21/37.00	—	—	—
	<i>J</i> =5	—	—	—	—	1.45/37.15	—	1.93/26.20	1.34/36.00
	<i>J</i> =6	—	2.71/24.00	—	—	1.27/42.00	—	—	1.51/40.00
待机功率		7.5	4.5	2.5	5.0	3.5	6.5	4.0	6.0

小为 2×popsize 的新种群,通过帕累托等级和拥挤度将种群中的个体进行排序,根据排序结果从种群中筛选出不重复的个体放入候选解集中,按照候选解集中的个体帕累托等级由低到高排序,优先选择等级低的个体放入新的父代种群,若等级相同,则优先选择拥挤度较大的个体,直至新的父代种群中个体个数为 popsize。

3 实例仿真与分析

3.1 案例说明

通过整理分析某航空企业数控加工车间的数据,可以得到一个结构为 15-6-8-6 的案例,其中 15 是工单任务 *i* 的数量,第一个 6 是指每个工单 *i* 包括 6 道加工工序,即 *J_i*=6,8 是指数控加工设备 *M* 的数量,第二个 6 表示该车间共有 6 名工人。限于篇幅,部分加工时间和功率的具体数据见表 4,每

道工序的加工准备时间为 0.5h。单位数量的工人对机器的影响能力 λ=0.8,理论加工功率和实际加工功率之间的转换系数 α=1.20。使用 MATLAB R2016a 进行仿真,算法参数设置:种群规模大小 popsize=200,最大迭代次数 maxgen=1000,交叉概率 PC=0.8,变异概率 PM=0.3。

3.2 仿真结果与分析

通过数据仿真得到航空零件柔性作业车间调度在最大完工时间、机器总负载以及机器能耗三个调度目标维度上形成的帕累托最优前沿,如图 9 所示。由图 9(a)可知,调度方案的三个目标间的关系为非线性的;由图 9(b)可知,最大完工时间与机器总负载呈悖反关系,当最大完工时间增加时,机器总负载减少;结合图 9(c)和图 9(d)可知,当机器总能耗相同时,机器总负载和最大完工时间的值也不相同,且随着机器总能耗的增加,最大完工时间逐渐增加,而机器总

负载呈降低趋势。

本文从帕累托解中筛选出使三个目标函数值分别最小的方案,各方案下的目标函数值见表5,不同方案下的最佳调度甘特图如图10~图12所示。从表5可知:(1)方案1的最大完工时间最小,为27.56h,但其机器总负载比方案2增加了23.49h,机器总能耗比方案3增加了79.04kW·h。从图10可知,为了确保生产过程平稳,需平衡各机器上的加工任务,但将造成能耗的增加,该方案适合于对均衡生产较高要求的生产任务。(2)方案2的机器总负载最小,为117.39h,但其最大完工时间相比于方案1增加了20.92h,机器总能耗与方案3相比增加了532.85kW·h。从图11可知,为减小机器负载,设备待机时间增加,使得最大完工时间和机器能耗增加,因此此种方案适合非紧急工单下的生产调度。(3)方案3的机器总能耗最小,为5765.23kW·h,最大完工时间与方案1相比增加了5.1h,机器总负载相比于方案2增加了18.91h。从图12可知,此种方案作业安排紧凑,考虑了机器待机与加工要求,有效减少了能耗消耗。

表5 不同方案下的目标函数值

Table 5 Results of different schedule schemes

方案	最大完工时间/h	机器总负载/h	机器总能耗/(kW·h)
1	27.56	140.88	5844.26
2	48.48	117.39	6298.07
3	32.66	136.30	5765.23

由此可见,不同的调度方案有不同的侧重点,因此决策者可以根据生产任务要求,选择不同的调度方案,在实现低碳排放的同时,更加灵活地安排加工任务。

3.3 算法对比

为了验证本文设计的算法的先进性,将提出的基于组合邻域的NSGA-II算法和传统NSGA-II算法通过三组算例进行了对比分析:算例1的结构为6-6-3-2,算例2的结构为15-6-8-6,算例3的结构为30-6-10-7,并在参数设置相同的情况下进行多次测试,对算法结果取平均值进行对比,表6给出了基于组合邻域的NSGA-II算法和传统NSGA-II算法分别运行10次得到的帕累托最优前沿中个体优化目标的最优值和平均值。

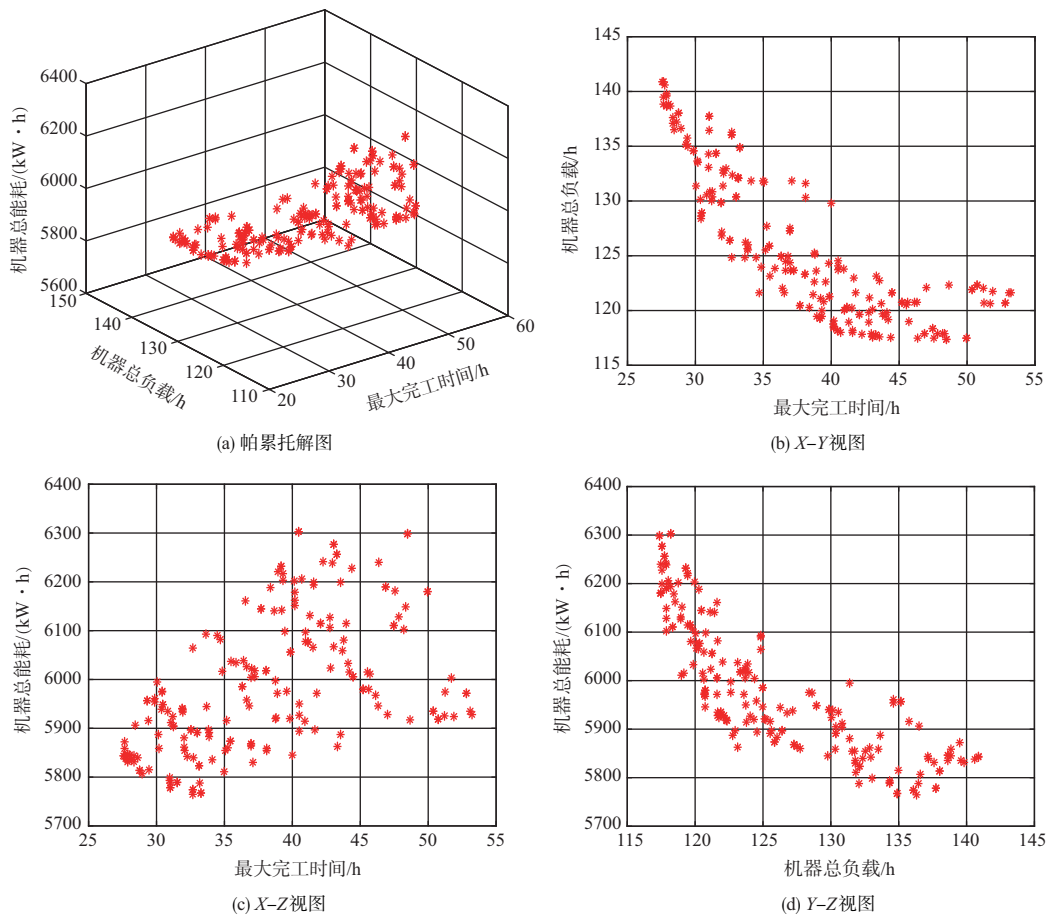


图9 帕累托前沿解分布图

Fig.9 Distribution of Pareto front

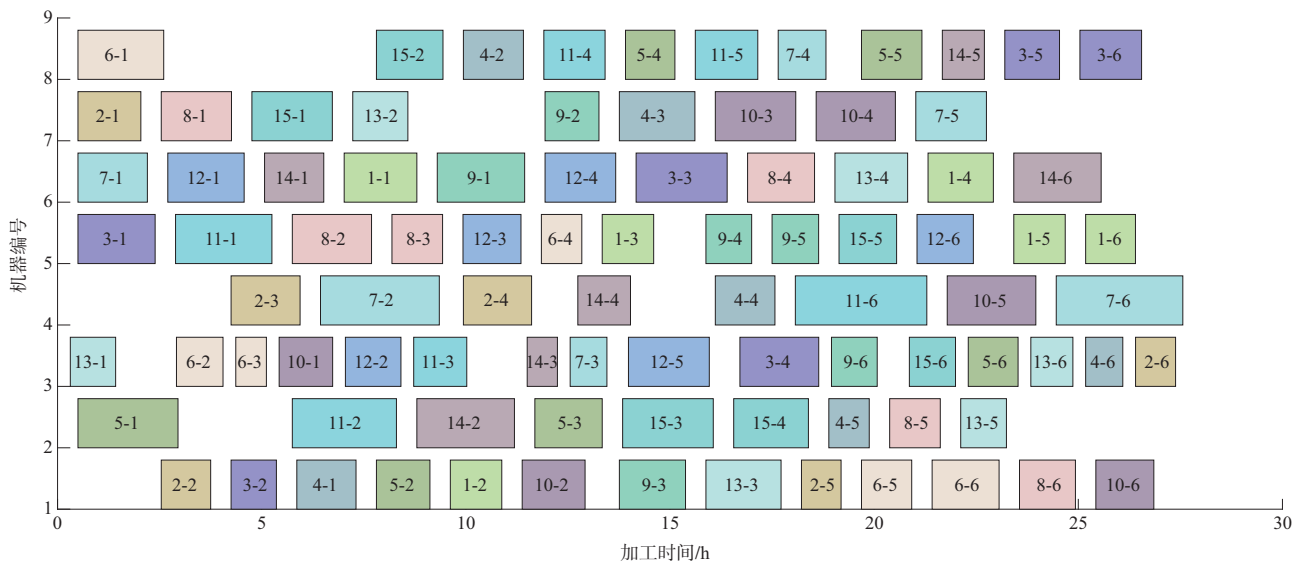


图 10 最大完工时间最小的调度方案甘特图

Fig.10 Gantt chart of scheduling scheme with minimum makespan

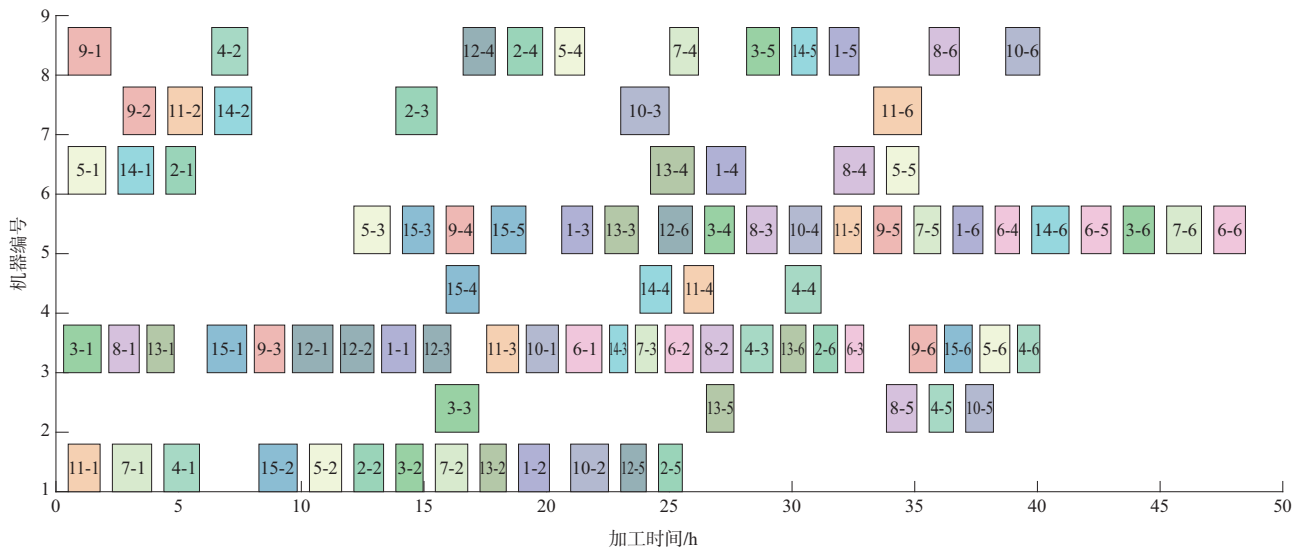


图 11 机器总负载最小的调度方案甘特图

Fig.11 Gantt chart of scheduling scheme with minimum total machine load

由表6可以看出,与传统NSGA-II算法相比,基于组合邻域的NSGA-II算法求得各优化目标的最优值和平均值均有改善,且对于最大完工时间提升尤其明显。在最大完工时间目标下,基于组合邻域的NSGA-II算法的目标值均优于传统算法,且在最优值寻优上最大提升率可达10.99%;在机器总负载目标下,虽偶有平均值大于传统算法,但差别非常小,仅为0.18h和0.75h;在机器总能耗目标下,基于组合邻域的NSGA-II算法的解质量均优于传统算法,且随着问题规模的扩大,对车间能耗的提升率逐步增加,最高可达

3.44%。因此,本文提出的基于组合邻域的NSGA-II算法的寻优能力明显优于传统的NSGA-II算法。

4 结束语

本文以智能制造环境下的航空零件柔性作业车间为背景,在考虑任务合理分配和多人多机协作生产的基础上,基于机器加工和待机两种工作状态,建立了以最小化最大完工时间、机器总负载和机器能耗为目标的多品种小批量车间绿色调度多目标优化模型,并设计了以工序优先级、机器

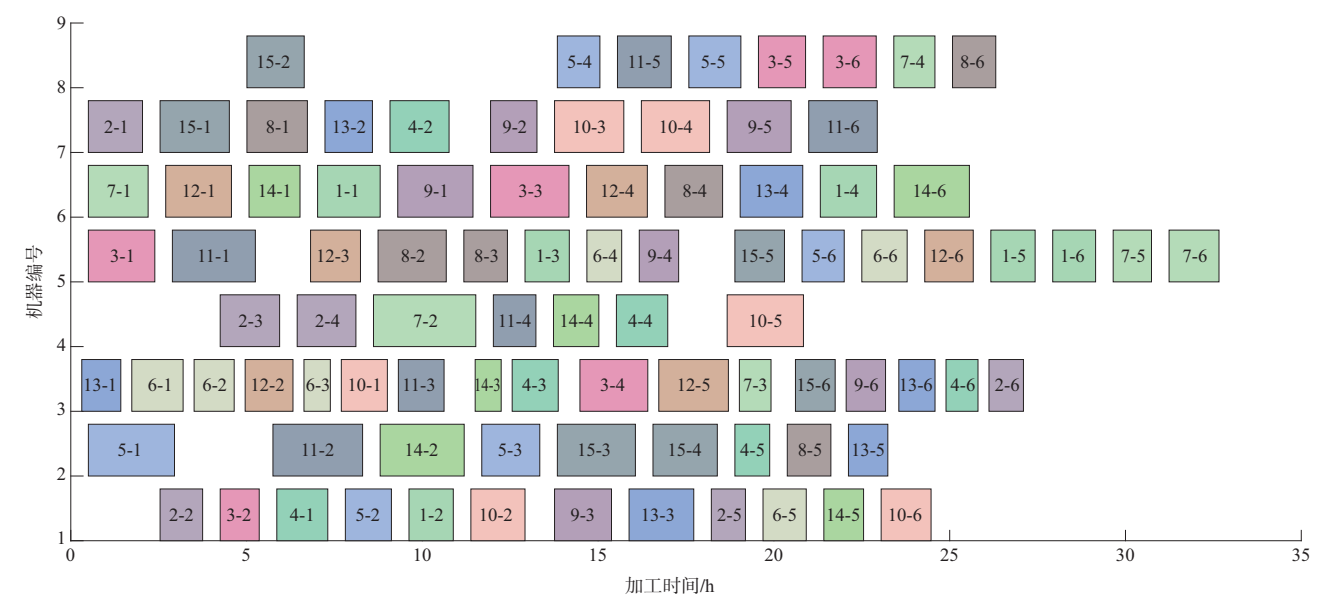


图 12 机器总能耗最小的调度方案甘特图

Fig.12 Gantt chart of scheduling scheme with minimum total energy consumption

表 6 算法结果比较

Table 6 Results of each method

算例规模	改进的NSGA-II算法				传统NSGA-II算法			
		最大完工时间/h	机器总负载/h	机器总能耗/(kW·h)		最大完工时间/h	机器总负载/h	机器总能耗/(kW·h)
算例 1	最优	23.67	50.67	2136.33	最优	25.56	50.67	2176.02
	平均	26.82	50.89	2198.08	平均	27.11	50.71	2208.67
算例 2	最优	25.18	117.37	5677.57	最优	27.75	117.37	5827.51
	平均	35.09	122.87	5907.28	平均	37.71	122.12	6033.36
算例 3	最优	37.97	215.6	9646.12	最优	42.66	216.65	9975.46
	平均	46.33	223.69	10002.95	平均	48.72	232.95	10359.48

指派、指派人员优先度和指派人员数量为基础的 4 层编码方式,实现了对机器和人员的分配;针对调度问题多目标的特性,提出了基于邻域搜索的 NSGA-II 算法,设计了多种邻域搜索算子以提高算法搜索能力;最后通过某航空企业数控加工车间的实际调度案例,验证了模型和算法的有效性,并采用不同规模的算例验证了改进的 NSGA-II 算法的可靠性与优越性。案例分析表明,通过本文提出的方法,可以在兼顾生产效率和加工成本的同时,实现航空零件柔性作业车间的低碳排放。但是,本文的研究考虑了多人协作操作多台设备的问题,而这里主要考虑的是同类型或者功能相似的设备,因此,存在多种加工设备的车间级的大规模复杂调度问题,则是未来研究的重点方向。

AST

参考文献

[1] 娄航宇,张吉善,赵云博. 基于扩展双资源约束型航空构件制

造车间调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3329-3340.

Lou Hangyu, Zhang Jishan, Zhao Yunbo. Scheduling method for aerospace components production shop based on extended dual constrains[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(12): 3329- 3340.(in Chinese)

[2] 隋少春,黎小华,李汶一,等. 面向智能制造模式的飞机制造企业生产管控中心研究[C].2017 年(第三届)中国航空科学技术大会,2017.

Sui Shaochun, Li Xiaohua, Li Wenyi, et al. Research on production management and controlling center of aircraft manufacturer for intelligent manufacturing mode[C].2017 (3rd) China Aviation Science and Technology Conference, 2017. (in Chinese)

[3] 李开省. 碳中和目标下航空能源转型研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 1-11.

- Li Kaisheng. Research on the transformation of aviation energy under the carbon neutrality[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 1-11. (in Chinese)
- [4] 孙棋棋, 丁谋. 航空复材生产车间的智能服务化排产调度研究[J]. 智能制造, 2017(12): 39-43.
- Sun Qiqi, Ding Mou. Research on intelligent service scheduling of aviation composite workshop[J]. Intelligent Manufacturing, 2017(12): 39-43. (in Chinese)
- [5] 刘辉, 严洪森. 基于改进文化基因算法的航空发动机装配车间调度优化研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(8): 123-126.
- Liu Hui, Yan Hongsen. Research on optimization of aeroengine assembly shop scheduling based on improved memetic algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(8): 123-126. (in Chinese)
- [6] 王晋, 王鹏, 郭丰赫. 基于改进匈牙利算法的航空企业动态调度方法研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 551-559+565.
- Wang Jin, Wang Peng, Guo Fenghe. Method study on dynamic scheduling for aviation manufacturing enterprise based on the improved Hungary algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 551-559+565. (in Chinese)
- [7] 吕玉江, 孟召军, 杨伟, 等. AGV关键技术在航空制造车间的应用展望[J]. 航空科学技术, 2021, 32(7): 1-11.
- Lyu Yujiang, Meng Zhaojun, Yang Wei, et al. Application prospect of AGV key technology in aeronautical manufacturing workshop[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(7): 1-11. (in Chinese)
- [8] 刘震宇, 汪越雷, 周庞睿. 基于Dijkstra算法的航空兵器自动生产线动态调度算法的研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(3): 94-98.
- Liu Zhenyu, Wang Yuelei, Zhou Pangrui. Research on dynamic scheduling algorithm of aviation weapon automatic production line based on Dijkstra algorithm[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(3): 94-98. (in Chinese)
- [9] 连裕翔, 张超勇, 孟磊磊, 等. 基于改进Jaya算法的柔性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3172-3184.
- Lian Yuxiang, Zhao Chaoyong, Meng Leilei, et al. Improved Jaya algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(11): 3172-3184. (in Chinese)
- [10] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 385-391.
- Wang Ling, Wang Jingjing, Wu Chuge. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 385-391. (in Chinese)
- [11] Yi Xiongfeng, Zhao Xihong, Zhi Wuli, et al. Integrated intelligent green scheduling of sustainable flexible workshop with edge computing considering uncertain machine state [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119070.
- [12] 李龙, 王黎明, 李方义. 面向流水车间的绿色生产多目标调度优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(7): 164-168.
- Li Long, Wang Liming, Li Fangyi. A multi-objective model of flow-shop for sustainable scheduling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(7): 164-168. (in Chinese)
- [13] 李益兵, 黄炜星, 吴锐. 基于改进人工蜂群算法的多目标绿色柔性作业车间调度研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1344-1350+1385.
- Li Yibing, Huang Weixing, Wu Rui. Research on multi-objective green flexible job-shop scheduling based on improved ABC algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11): 1344-1350+1385. (in Chinese)
- [14] 戴敏, 张玉伟, 曾励. 绿色作业车间机器与AGV的集成调度研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 468-477.
- Dai Min, Zhang Yuwei, Zeng Li. Integrated scheduling of machines and AGVs in green job shop[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 468-477. (in Chinese)
- [15] Dai Min, Tang Dunbing, Adriana G, et al. Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 59: 143-157.
- [16] 刘琼, 田有全, John W S, 等. 产品制造过程碳足迹核算及其优化问题[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2336-2343.
- Liu Qiong, Tian Youquan, John W S, et al. Calculation and optimization of product carbon footprint in its manufacturing process[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2336-2343. (in Chinese)
- [17] 罗雄, 钱谦, 伏云发. 遗传算法解柔性作业车间调度问题应用

综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 15-21+34.

Luo Xiong, Qian Qian, Fu Yunfa. Review of application of genetic algorithm for solving flexible job shop scheduling

problems[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55 (23): 15-21+34. (in Chinese)

Aerial Accessory Flexible Job Shop Scheduling Optimization Considering Carbon Low Emissions

Liu Hui¹, Xu Zhitao^{1,2}, Chen Wenfei³, Hu Zeru⁴

1. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China*

2. *Key Laboratory of Intelligent Decision and Digital Operations, Ministry of Industrial and Information Technology, Nanjing 211106, China*

3. *Ningbo Special Equipment Inspection & Research Institute, Ningbo 315211, China*

4. *Chongqing Branch of China Classification Society Certification Company, Chongqing 400011, China*

Abstract: Carbon emission reduction in aerial accessory manufacturing is one of the main ways to achieve green aviation industry. In this paper, it consider the multi-specification and small-batch production as well as the cooperation between the workforce and the machine for low-carbon scheduling optimization in aerial accessory flexible job shop. The proposed model aims to minimize the maximum makespan, total machine load and energy consumption considering the energy consumption of the machines under various working consideration. Firstly, a four layer coding method is used to realize the rational allocation of machines and personnel. Secondly, in order to avoid the premature problem of the algorithm and obtain high-quality solutions, the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) with neighborhood search was proposed. Finally, the mathematical model and the modified NSGA-II are verified using a real-world case. The results show that the proposed approach is able to generate low-carbon solutions for aerial accessory flexible job shop scheduling while promising a high manufacturing efficiency and a low manufacturing cost.

Key Words: aerial accessory manufacturing; flexible job shop scheduling; man-machine cooperation; multi-objective optimization; NSGA-II algorithm

Received: 2023-05-26; **Revised:** 2023-09-25; **Accepted:** 2023-10-23

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2018ZE52057); Major Program of the Philosophy and Social Sciences in Jiangsu Universities (2023SJZD127) ; Fundamental Research Funds for the Central Universities (ND2023006,NJ2023027)