



引用格式:杨幸博,罗国富,宋俊杰,等.多目标柔性作业车间低碳调度研究[J].轻工学报,2020,35(6):93-99.

中图分类号:TH166 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.06.011

文章编号:2096-1553(2020)06-0093-07

多目标柔性作业车间低碳调度研究

Research on low carbon scheduling of multi-objective flexible job shop

杨幸博¹,罗国富¹,宋俊杰²,张俊豪¹,张宁波¹,李亚为¹
YANG Xingbo¹,LUO Guofu¹,SONG Junjie²,ZHANG Junhao¹,ZHANG Ningbo¹,
LI Yawei¹

关键词:

柔性作业车间;低碳调度;碳排放量;多目标优化;加权求和法;遗传算法;变邻域搜索

Key words:

flexible job shop;
low carbon scheduling;
carbon emission;
multi-objective optimization;
weighted sum method;
genetic algorithm;
variable neighborhood search

1. 郑州轻工业大学机电工程学院,河南 郑州 450002;
2. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司,河南 南阳 473000
1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Light Industry University, Zhengzhou 450002, China;
2. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473000, China

摘要:针对作业车间低碳调度问题,提出了基于遗传变邻域混合算法的多目标柔性作业车间低碳调度模型.该模型在核算机械加工系统碳排放量时,综合考虑了由机器消耗能源直接产生的碳排放和处理废弃物间接产生的碳排放,建立了完工时间、机器总负载和碳排放量的目标函数,并采用多目标加权法对目标函数进行加权求和,最后利用遗传变邻域混合算法对调度模型进行求解.仿真结果表明,本文模型可以在保证完工时间和设备利用率均衡的前提下,减少生产过程中的碳排放量,验证了该模型的可行性和有效性.

收稿日期:2020-05-09

基金项目:河南省科技创新杰出青年基金项目(184100510007)

作者简介:杨幸博(1994—),男,河南省洛阳市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为数字化设计与制造.

通信作者:罗国富(1963—),男,河南省禹州市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为CAD/CAM、敏捷制造、企业信息集成等.

Abstract: Aiming at the low carbon job shop scheduling problem, a low carbon scheduling model of multi-objective flexible job shop based on genetic variable neighborhood hybrid algorithm was proposed. When calculating the carbon emissions of mechanical processing system, the carbon emissions directly generated by machine energy consumption and indirect carbon emissions from waste treatment were comprehensively considered. The objective functions of completion time, total machine load and carbon emissions were established. The multi-objective weighting method was used to sum up the objective functions. Finally, the genetic variable neighborhood hybrid algorithm was used to optimize the scheduling model. The simulation results showed that the model could reduce carbon emissions in the production process under the premise of ensuring the balance of completion time and equipment utilization, which verified the feasibility and effectiveness of the model.

0 引言

随着全球经济的迅速发展,能源的使用量不断增加,产生的大量温室气体已造成全球气温不断升高,带来了严重的环境问题^[1]. 制造业作为全球经济发展的重要推动力,每年消耗全球近1/3的能源,由此产生了大量的CO₂^[2]. 我国当前正处在工业化发展的关键阶段,一些企业仍采用高能耗、高排放的生产模式,这在一定程度上成为制约我国制造业可持续发展的瓶颈. 因此,面对日益严峻的气候变化和能源消耗问题,如何实现节能减排、发展低碳经济是目前急需解决的关键问题之一.

生产调度问题是一类典型的组合优化问题,通过高效的优化调度方法来提高车间的生产效益,是智能制造中管理决策和资源分配的核心^[3]. 柔性作业车间调度问题(Flexible Job-shop Scheduling Problem, FJSP)是生产调度问题的扩展,允许工件的不同工序在不同的机器上进行加工,更加符合现代制造车间的实际生产情况,是调度领域重要的研究方向^[4]. FJSP已经被证明是NP-hard问题^[5],在车间生产过程中,直接影响产品的加工顺序和加工机器的选择,进而影响工件在机器上的加工时间. 机器加工时间越长,所消耗的能源越多,碳排放量也就越多. 因此,如果在制订生产计划和调整策略上考虑能耗因素,无疑是实现节能减排、绿色制造的一种有效方式^[6]. 针对此问题,国内外学者已

经开展了较为广泛的研究. M. Gokan等^[7]提出了一种旨在改善作业车间系统环境绩效的生产调度策略,利用该策略在实现最佳完工时间的同时,还可降低总能量消耗. Y. Liu等^[8]针对碳纤维复合材料回收车间提出了一种降低能耗的方法,建立了最小化加工总能耗和完工时间的双目标问题模型,并利用改进的遗传算法进行求解. 解潇晗等^[9]研究了柔性作业车间中机床运行模式的能耗特点和完工时间,实现了面向能耗优化的多目标柔性作业车间调度. 张国辉等^[10]针对低碳排放约束下的柔性作业车间调度问题,设计了不同机器间的碳排放模型. 刘献礼等^[11]研究了机械加工过程中低碳制造的相关理论和方法,为低碳研究提供了理论基础和技术指导. 栾飞等^[12]构建了以碳排放和完工时间成本加权和最小为目标的低碳柔性作业车间调度模型,并采用改进的鲸鱼优化算法对其进行验证.

虽然针对作业车间的低碳调度已有大量的研究成果,但是对多目标低碳车间调度的研究仍处于起步阶段. 鉴于此,本文拟综合考虑由机床消耗能源直接产生的碳排放和处理废液、废料间接产生的碳排放,建立以完工时间和机器总负载最小、总碳排放量最低为优化目标的多目标柔性作业车间低碳调度模型,以期在保证完工时间和设备利用率均衡的前提下,减少生产过程中的碳排放量,从而实现低碳的多目标柔性作业车间调度.

1 机械加工系统碳排放的核算

产品在制造过程中的碳排放涉及到原材料制备、零件加工、工件运输等多个环节,这些环节都会直接或间接地产生碳排放. 本文把机械加工系统产生的碳排放主要分为两大类:一类是加工过程中消耗资源所产生的碳排放,如机床在加工过程中消耗电能所产生的碳排放;另一类是处理或二次回收加工过程中产生的废弃物所产生的碳排放,如对废弃的冷却液进行处理后排入污水系统时所产生的碳排放.

1.1 加工过程产生的碳排放

机床是零件加工过程的载体,选择不同的机床加工工件所消耗的能量也不同,因此有必要对机床加工过程中能量的消耗情况进行研究. 机器的实际运行状态是一个启动、预热、空载、加工、空载、卸载的动态转换过程,处于不同状态下的机床能耗也不同^[13]. 启动时,机床的瞬时功率较大,但持续时间比较短,且开机后需要预热一段时间才能工作;加工时,机床所消耗的能量主要用于切削工件和维持辅助系统的运行,当主轴的转速恒定时,单位时间内机器产生的碳排放量保持不变;空载时,机床所消耗的能量主要用于维持主轴的空转和自动换刀、退刀等刀具操作. 因此,本文在计算机床的碳排放量时主要考虑启动、预热、加工、空载这4个关键阶段.

1.2 废弃物处理过程产生的碳排放

机床需要定期更换冷却液和润滑油,为防止造成二次污染,需要对废液进行处理后才能进行排放. 机床对原材料进行加工会产生大量的废料,一般会对这些废料进行二次回收,即回炉处理. 在对废液和废料进行回收处理时也会消耗能源,间接造成碳排放. 由于消耗的能源种类较多,计算比较复杂,为了便于研究和计算,需要将能耗转换成统一的标准,即可将处理单位废液和废料所消耗的能量转换成折标煤系数:处理

每升废液耗能折标煤系数 $a_1 = 4.5$,处理每千克废料耗能折标煤系数 $a_2 = 0.011$. 中小型企业电能的碳排放因子 $\sigma(\text{CO}_2) = 0.540 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;润滑油的碳排放因子 $\sigma(\text{CO}_2) = 0.469 \text{ kg}/\text{L}$;冷却液的碳排放因子 $\sigma(\text{CO}_2) = 5.143 \text{ kg}/\text{L}$ ^[14-15].

2 柔性作业车间低碳调度问题

2.1 问题描述

低碳环境下的FJSP可以描述为: n 个工件在 m 台机器上加工,每个工件包含若干道工序,每道工序可以在一台或者多台机器上进行,不同型号的机床能耗不同,加工过程中 CO_2 的排放量也不尽相同. 通过合理选择各个工件的加工机器和加工顺序,不仅可以按时完成工件的加工,还可以降低资源消耗对环境的影响,使整个加工系统的性能达到最优.

该问题有如下假设:

- 1) 同一工件在前道工序完成后才能进行下一道工序;
- 2) 当工件开始加工后到完工前不可以停止;
- 3) 各个工件的工序彼此不存在相互制约的关系;
- 4) 每台机器在同一时间只能加工一道工序;
- 5) 各个工件之间具有相同的优先级;
- 6) 不同性能的机器产生的碳排放量不同.

2.2 多目标柔性作业车间低碳调度模型的建立

完工时间可以直观反映车间的生产效率,机器总负载能够减少设备的整体损耗和车间的生产成本^[16],这些都是企业所关注的重要目标. 因此,为了减少产品加工过程中的总碳排放量(E),同时又要保证完工时间(C_{\max})并达到机器总负载(W_T)最小的目标,建立如下多目标柔性作业车间低碳调度模型:

$$f_1 = \min C_{\max} = \min \{ \max C_i; i = 1, 2, 3, \dots, n \} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} C_{ijk} - C_{i(j-1)m} \geq t_{ijk} \\ C_{egk} - C_{igh} \geq t_{egk} \\ C_{ijk} \geq t_{ijk} \end{cases}$$

$$f_2 = \min W_T = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^m X_{ijk} (t_{ijkp} + t_{ijk} + t_{ijkq}) \right\} \quad (2)$$

$$f_3 = \min E = \min \left\{ \sum_{k=1}^m E_{ks} t_{ks} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^m X_{ijk} E_{ijk} t_{ijk} + \sum_{k=1}^m E_{ke} t_{ke} + \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^h S_{ij} a_1 \tau + \sum_{j=1}^h L_{ij} a_2 \tau \right) \right\} \quad (3)$$

其中,式①表示工件的最小化最大完工时间;式②表示最小化机器总负载,它包括工序 O_{ij} 在机器 k 上的准备时间 t_{ijkp} 、加工时间 t_{ijk} 和空闲时间 t_{ijkq} ; X_{ijk} 是决策变量,当工件 i 的工序 j 在机器 k 上加工时, $X_{ijk} = 1$,否则 $X_{ijk} = 0$;式③表示总碳排放量最低,它包括所有机器启动、预热、加工、空载时的碳排放量与处理废料和废液产生的碳排放量。

本文建立的多目标柔性作业车间低碳调度模型的部分符号描述如表1所示。

对于多目标优化问题,往往很难保证在满足约束条件下多个目标函数同时达到最优。因此,本文采用加权求和法按各目标的重要程度为其分配不同的权重系数^[17],然后通过线性加权构造新的目标函数,这样将多目标问题转换为单目标优化问题,使求解最优调度过程更加简单。具体操作步骤如下:

$$\min f = \min (w_1 C_{\max}^* + w_2 W_T^* + w_3 E^*)$$

其中, w_1 、 w_2 、 w_3 分别表示完工时间、机器总负载和碳排放量的权重系数, $w_1 \geq 0$ 、 $w_2 \geq 0$ 、 $w_3 \geq 0$,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

考虑到各个目标函数的单位不同,无法直接进行比较和运算,所以首先要对各个目标函数进行归一化处理,具体做法如下:

表1 多目标柔性作业车间低碳调度模型的部分符号描述

Table 1 Partial symbolic description of multi objective flexible job shop low carbon scheduling model

符号	含义
n_i	工件 i 的工序数量
O_{ij}	工件 i 的工序 j
C_i	完工时间
t_{ks}	机器 k 的启动及预热时间
E_{ks}	机器 k 启动及预热时的单位碳排放量
E_{ke}	机器 k 空载时的单位碳排放量
t_{ke}	加工机器 k 的空载时间
C_{ijk}	工序 O_{ij} 在机器 k 上的完工时间
S_{ij}	完成工序 O_{ij} 时废液的排放量
E_{ijk}	工序 O_{ij} 在机器 k 上加工时的单位碳排放量
L_{ij}	完成工序 O_{ij} 时废料的排放量
τ	处理废液消耗能源的碳排放因子

$$C_{\max}^* = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}$$

$$W_T^* = \frac{W_T - W_{T_{\min}}}{W_{T_{\max}} - W_{T_{\min}}}$$

$$E^* = \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

归一化处理后的目标函数为

$$\min f =$$

$$\min \left(w_1 \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} + w_2 \frac{W_T - W_{T_{\min}}}{W_{T_{\max}} - W_{T_{\min}}} + w_3 \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \right)$$

其中, C_{\max} 、 $W_{T_{\max}}$ 、 E_{\max} 分别是当前种群中单目标函数优化的最大值; C_{\min} 、 $W_{T_{\min}}$ 、 E_{\min} 分别是当前种群中单目标函数优化的最小值。

2.3 算法的选择

FJSP是较为复杂的组合优化问题,目前多采用遗传算法、变邻域搜索算法等算法求解^[18]。其中,遗传算法因其通用性较强、计算优良、全局搜索性强等特点,被广泛应用于柔性作业车间调度^[19]。但遗传算法在求解问题时,容易陷入局部最优解。变邻域搜索算法通过不同邻域的递进式排查,在反复迭代过程中使当前的局部最优解逐渐向最优解靠近,具有

很强的局部搜索能力^[20]. 因此,本文将变邻域搜索算法嵌入到遗传算法中,使混合算法具有较强的局部搜索能力和全局搜索能力,提高对FJSP的求解速度和质量.

3 实例验证与结果分析

以某柔性制造车间6个工件($J_1—J_6$)在6台机器($M_1—M_6$)上进行加工为例,验证本文所提出的多目标柔性作业车间低碳调度模型的有效性和实用性. 制造车间的数据如表2和表3所示,其中表2中每组4个数据分别表示某工序在某台机器进行加工的准备时间/min、加工时间/min、卸载时间/min、加工时单位碳排放

量 $\rho(\text{CO}_2)/\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$. 算法的相关参数设置如下:种群规模 $P = 200$,迭代次数 $n = 200$,交叉概率 $P_m = 0.8$,变异概率 $P_c = 0.06$. 利用Matlab对本文设计的遗传变邻域混合算法进行编成求解,硬件运行环境为:处理器为Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @ 3.30 GHz、内存(RAM)为8.00 GB. 分别对完工时间、机器总负载和碳排放量的权重系数进行人工设置和随机生成,利用基于遗传变邻域混合算法的多目标柔性作业车间低碳调度模型运行20次,根据完工时间、机器总负载和碳排放量的决策变量偏向的不同,选取其中10组较优实验结果进行对比分析,结果如表4所示.

表2 各工件在不同机器上的加工数据

Table 2 Processing data of each workpiece on different machines

工件	工序	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
J_1	O_{11}	1.0/9/1/3.0	2.0/13/1/2.0	—	2.0/13/1/2.0	—	1.0/13/1/2.0
	O_{12}	—	1.0/7/1/3.0	1.0/5/1/2.1	2.0/14/2/2.0	3.0/13/2/3.0	—
	O_{13}	—	2.0/5/1/2.4	—	—	1.0/15/1/2.0	1.0/7/1/1.7
	O_{14}	1.0/12/1/2.0	—	1.5/14/2/2	2.0/12/1/2.0	—	—
	O_{15}	1.0/6/1/3.1	1.0/6/1/3.2	1.0/8/1/1.5	1.0/7/1/2.0	2.0/4/1/1.2	1.0/8/1/1.5
	O_{16}	—	—	2.0/15/2/1.6	—	2.0/13/1/3.0	1.0/15/1/1.6
J_2	O_{21}	2.0/13/1/1.5	—	1.0/4/1/1.0	2.0/16/1/2.3	1.0/11/1/2.5	—
	O_{22}	—	1.0/15/1/1.2	1.0/6/1/2.2	1.0/6/1/2.2	—	2.0/12/1/1.3
	O_{23}	1.0/5/1/2.3	—	2.0/13/1/1.6	2.0/10/1/2.6	1.0/13/2/2.3	—
J_3	O_{31}	2.0/14/2/2.4	3.0/15/2/2.7	1.5/5/1/1.0	1.0/5/1/2.8	1.0/4/1/3.2	—
	O_{32}	—	1.0/6/1/2.0	1.0/7/1/2.1	—	3.0/16/1/1.2	2.0/12/3/2.0
	O_{33}	1.0/5/1/2.5	1.0/8/1/2.2	—	2.0/11/1/2.5	—	2.0/14/3/1.0
	O_{34}	—	1.0/6/1/1.5	2.0/17/1/2.1	1.0/14/1/2.4	1.5/12/1/2.0	—
	O_{35}	2.0/17/1/2.4	—	2.0/14/1/2.4	2.0/6/1/3.0	2.0/7/1/2.4	2.0/13/2/2.3
J_4	O_{41}	1.0/19/1/3.0	—	1.0/20/2/3.0	2.0/13/1/2.5	3.0/15/2/2.4	—
	O_{42}	—	2.0/10/1/2.5	2.0/7/1/1.0	2.0/13/2/2.5	1.0/7/1/5.0	1.0/15/1/1.4
	O_{43}	1.0/4/1/2.5	1.0/8/1/2.0	—	—	—	2.0/15/2/2.0
	O_{44}	2.0/10/1/3.2	—	1.0/6/1/1.6	—	1.0/6/2/1.6	—
	O_{45}	2.0/15/2/2.6	2.0/8/1/2.3	1.0/15/2/1.7	1.0/13/2/2.0	—	—
J_5	O_{51}	—	1.0/6/1/2.2	—	2.0/7/1/2.6	2.0/12/1/2.0	1.0/5/1/0.9
	O_{52}	2.0/8/2/4.0	—	2.0/12/1/2.6	2.0/15/2/2.5	—	1.0/8/1/0.6
	O_{53}	2.0/13/1/2.4	2.0/12/2/2.3	—	—	2.0/16/2/1.6	1.0/7/1/0.8
	O_{54}	—	1.0/4/1/2.0	1.0/6/1/2.0	1.0/6/2/3.0	1.0/12/1/1.4	—
	O_{55}	1.0/13/2/3.2	—	—	1.0/7/1/2.5	—	2.0/8/1/1.3
	O_{56}	1.0/11/2/2.8	1.0/3/1/2.5	2.0/10/1/2.5	2.0/12/1/2.4	2.0/15/2/1.0	1.0/5/1/0.9
J_6	O_{61}	—	2.0/11/1/1.2	—	—	1.0/7/1/1.0	1.0/8/1/0.8
	O_{62}	—	—	2.0/8/2/2.0	2.0/12/1/3.0	—	2.0/4/2/1.0
	O_{63}	1.0/10/1/2.4	1.0/5/1/1.0	—	2.0/13/1/2.1	—	2.0/6/1/1.0
	O_{64}	2.0/16/2/2.2	—	2.0/8/2/1.7	—	—	3.0/12/2/1.1

表3 机器启动时间和在各阶段的单位碳排放量

Table 3 Machine start-up time and unit carbon emission at each stage

机器编号	启动时间/min	$\rho(\text{CO}_2)/(\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$		
		启动	准备	卸载
M_1	2.2	1.52	0.50	0.20
M_2	1.4	1.75	0.40	0.15
M_3	3.1	1.55	0.35	0.10
M_4	1.5	1.68	0.42	0.15
M_5	2.3	1.72	0.36	0.10
M_6	1.6	1.45	0.25	0.10

表4 实例运行结果

Table 4 The result of example running

实验编号	C_{\max}/min	W_T/min	E_{\min}/kg
1	66.8	266.6	500.214
2	69.2	269.0	479.194
3	84.5	277.0	467.154
4	70.6	270.6	485.204
5	74.5	272.0	476.114
6	69.2	265.2	506.194
7	78.5	270.0	479.064
8	80.2	268.6	482.694
9	81.5	271.6	481.954
10	78.5	270.0	479.041

由表4可知,实验2为较优解,与决策变量偏向最大完工时间的实验1相比,在最大完工时间增加2.4 min的情况下,总碳排放量减少了21.020 kg;与决策变量偏向机器总负载的实验6相比,机器负载只增加了7.0 min;与决策变量偏向总碳排放量的实验3相比,在最大完工时间减少15.2 min的情况下,总碳排放量只增加了12.040 kg. 图1为实验2的迭代收敛曲线,图2是实验2的调度甘特图.

由图1可知,当迭代次数达到20次时,种群达到最优解并趋于稳定. 由图2可知,机床6的能耗较低,被分配了大量的工件;考虑到机器的总负载问题,平均加工能耗较大的机床4和机床5也被分配了少部分工件. 因此,通过多目标柔性作业车间低碳调度模型对机器的选择和加工工序的排序能够有效降低机械加工系统的碳排放量.

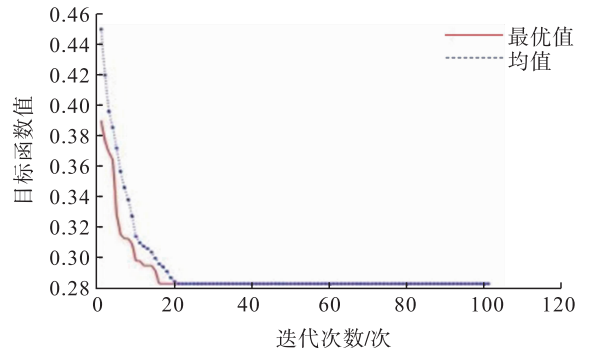


图1 实验2的迭代收敛曲线

Fig. 1 Iteration curve of scheme 2

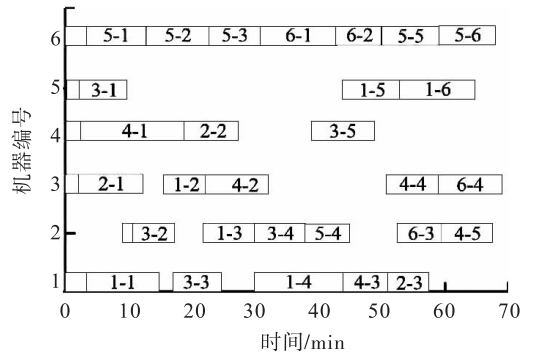


图2 实验2的调度甘特图

Fig. 2 Scheme 2 scheduling Gantt chart

综上,低碳调度车间生产过程中完工时间最小、机器总负载最小和碳排放最低是相互矛盾的目标. 当缩短完工时间时,机器总负载将增大,同时产生更多的碳排放;反之,当降低碳排放量时,最大完工时间将增加. 低碳调度问题是一个综合考虑经济效益和环境影响的现代制造模式,制造商可以根据车间的生产情况分配各优化目标的权重,对工件的加工过程进行优化调度,采用合理的加工方法来减少机械加工系统的碳排放.

4 结语

本文建立了以完工时间和机器总负载最小、碳排放最低为目标的柔性作业车间调度模型,并通过遗传变邻域算法进行求解. 仿真结果表明,本文模型在保证完工时间最小和机器总

负载最小的情况下,有效减少了碳排放量,验证了该模型的有效性和实用性.由于生产车间产生碳排放的因素较多,在今后的研究中,一方面要把工件在装卸搬运过程中所产生的碳排放考虑在内,进一步完善调度模型;另一方面可尝试将一些新型智能算法应用于车间调度问题,提高求解的速度和质量.

参考文献:

- [1] 孟磊磊,张超勇,邵新宇,等.面向节能的工艺规划与调度集成问题建模研究[J].机械工程学报,2019,55(16):185.
- [2] 黄夏宝,魏淑玲.考虑低碳的高维多目标柔性作业车间调度[J].武汉理工大学学报,2019,41(6):592.
- [3] 孙丽珍,毕利.多约束条件下的动态柔性作业车间调度研究[J].控制工程,2019,18(12):1.
- [4] 徐本柱,费晓璐,章兴玲.柔性作业车间批量划分与并行调度优化[J].计算机集成制造系统,2016,22(8):1953.
- [5] GAREY M R, SETHI J R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling[J]. Mathematics of Operations Research,1976,1(2):117.
- [6] 吴秀丽,孙阳君.机器多转速的柔性作业车间绿色调度问题[J].计算机集成制造系统,2018,24(4):862.
- [7] GOKAN M,BOJAN S,MARCO T. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling [J]. International Journal of Production Research,2015,53(23):1.
- [8] LIU Y, TIWARI A. An investigation into minimizing total energy consumption and total completion time in a flexible job shop for recycling carbon fiber reinforced polymer [J]. Procedia CIRP,2015,29:722.
- [9] 解潇晗,朱晓春,周琦,等.低能耗柔性作业车间调度研究[J].机电工程,2020,37(2):132.
- [10] 张国辉,张海军,张理涛,等.改进遗传算法求解低碳约束的柔性车间调度问题[J].组合机床与自动化加工技术,2018(6):180.
- [11] 刘献礼,陈涛.机械制造中的低碳制造理论与技术[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):1.
- [12] 栾飞,蔡宗琰,吴书强,等.求解低碳车间调度问题的改进鲸鱼算法[J].机械科学与技术,2020(4):1.
- [13] 施金良,刘飞,许弟建,等.数控机床空载运行时节能决策模型及实用方法[J].中国机械工程,2009,20(11):1344.
- [14] 李先广,杨勇,李聪波,等.面向绿色制造的干式齿轮加工过程碳排放分析[J].中国机械工程,2014,25(16):2184.
- [15] 刘琼,田有全,SUTHERLAND J W,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.
- [16] 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.
- [17] MALAKOOTI B. Systematic decision process for intelligent decision making[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2011,22(4):627.
- [18] 高亮,张国辉,王晓娟.柔性作业车间调度智能算法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2012.
- [19] 李云龙,罗国富,文笑雨,等.基于混合遗传算法的云制造环境下柔性作业车间调度方案[J].轻工学报,2020,35(3):99.
- [20] 吴树景,游有鹏,罗福源.变邻域保优遗传算法求解柔性车间调度问题[J].计算机工程与应用,2020,18(20):1.