

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.02.004

低能耗柔性作业车间调度研究*

解潇晗¹, 朱晓春^{1*}, 周琦², 周志成², 梁伟²

(1. 南京工程学院 江苏省先进数控技术重点实验室, 江苏 南京 210000;

2. 国网江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏 南京 210000)

摘要:针对柔性作业车间低能耗调度问题,对机床运行模式下能源消耗特点和完工时间进行了研究。建立了以能源消耗和完工时间为目标函数的多目标优化模型;结合该模型特点,采用目标加权法,得到了能源消耗和完工时间两个变量加权求和的最小值;针对遗传算法单一染色体在解决较复杂问题时,无法准确表达问题解的缺点,设计了多层编码策略,对柔性作业车间制造过程中工件加工顺序和机床选择进行了优化,实现了面向能耗优化的多目标柔性作业车间调度;在 Matlab 环境中对生产实例进行了仿真。实验结果表明:在加入低能耗要求的车间调度中,基于改进遗传算法的调度策略是可行和有效的,决策者可根据偏好在一系列可行解中进行选择,以提高解的合理性、科学性。

关键词:柔性作业车间;多目标调度;多层编码;遗传算法

中图分类号:TH165

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)02-0132-06

Scheduling of low energy consumption flexible job shop

XIE Xiao-han¹, ZHU Xiao-chun¹, ZHOU Qi², ZHOU Zhi-cheng², LIANG Wei²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Numerical Control Technology, Nanjing Institute of Technology,

Nanjing 210000, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low energy consumption scheduling in flexible job shop, the energy consumption characteristics and makespan of machine tool operation mode were studied, and the multi-objective optimization model with energy consumption and makespan as the objective function was established. Combined with the characteristics of the model, the target weighting method was used to find the minimum of two variables of energy consumption and makespan. For the single chromosome of genetic algorithm could not accurately express the problem solution when solving more complicated problems, the multi-layer coding strategy was designed to optimize the workpiece processing sequence and machine tool selection during the manufacturing process, and realize low energy consumption flexible job shop scheduling. The production examples were simulated in Matlab. The experimental results show that the proposed scheduling strategy based on improved genetic algorithm is feasible and effective in the shop scheduling with low energy requirements. Decision makers can choose among a range of feasible solutions according to their preferences, and improve the rationality and scientificity of the solution.

Key words: flexible job shop (FJSP); multi-objective scheduling; multi-layer coding; genetic algorithm

0 引言

通过车间调度有效降低能源消耗,是企业实现可持续发展的必然要求^[1]。传统作业车间调度往往以

完工时间最短、成本最低等为优化目标。何斌等^[2]针对最小化最大完工时间为优化目标的作业车间调度问题,提出了一种基于动态交叉与变异概率的改进遗传算法,显著提高了算法寻优能力和收敛速度。

收稿日期:2019-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405220)

作者简介:解潇晗(1995-),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事机械制造自动化方面的研究。E-mail: 1025885682@qq.com

通信联系人:朱晓春,男,教授,硕士生导师。E-mail: zhuxc@njit.edu.cn

近年来,面向能耗优化的多目标柔性作业车间调度问题(MOFJSP)的研究尤为重要。LIU等^[3]提出了一种非支配排序遗传算法,解决了以最小化电能消耗为优化目标的生产调度问题;MANSOURI等^[4]明确了将能耗作为车间调度的指标之一,建立了多目标混合整数线性优化模型,提出了启发式算法,在完工时间和能源消耗之间进行了快速权衡分析;MOUZON等人^[5]针对单台CNC机床上调度作业的问题,以减少能耗和总完成时间为目标,开发了多种算法和多目标数学规划模型,该研究表明,机床在需要加工工件时启动,节省的能源占总能耗的比例高达80%。

本文针对制造作业车间,构建以能源消耗和完工时间为优化目标的调度模型,提出改进遗传算法,采用多层编码策略,在能耗和完工时间最优情况下,有效解决柔性车间作业调度问题。

1 低能耗柔性作业车间调度问题

1.1 问题描述

MOFJSP问题可以描述为:设有 M 台机床可加工 J 个工件。第 j 个工件的第 n 道工序表示为 O_{jn} ,每个工件的工序数为一道或多道,且已确定顺序,每道工序可由一台或多台机床加工完成。机床 $m \in M$ 加工工件 $j \in J$ 产生相应的加工时间和能耗。相邻两个加工任务之间,机床可以保持空转或关闭状态。频繁开启或关闭机器会消耗额外能量,且会缩短机床使用寿命,而机床处于空转状态时,只会消耗少量能量,故应在一段时间内保持机床处于空转状态。

本文研究的主要调度目标为最小化能源消耗,需要满足一定的约束条件,并确定工件的加工顺序以及相应的加工设备,最终使得调度性能指标整体处于最优。

约束条件如下:

- (1) 工件的各道工序只能在一台机床上进行加工;
- (2) 工件在加工过程中不能中断;
- (3) 同一时刻,每台机床仅可以加工一个工件,每个工件仅可以在一台机床上加工;
- (4) 机床可以存在停止或空载运行状态;
- (5) 同一工件的工序之间的操作优先级不会改变;
- (6) 不考虑工件加工前准备时间,所有工件和机床在 $t = 0$ 时刻均已准备就绪。

1.2 相关符号定义

车间的能耗模型可限制制造系统内的总能耗,同时最大限度地缩短最大完工时间。

相关的符号定义如表1所示。

表1 符号定义

符号	定义
J	工件
M	机床
T_{jm}	在机床 m 上加工工件 j 的加工时间
S_{jm}	在机床 m 上加工工件 j 的开始时间
C_{jm}	在机床 m 上加工工件 j 的结束时间
T_{max}	总完工时间
E_p	机床处于运行生产模式阶段时的总能耗
E_b	机床处于运行生产模式阶段时的基本能耗
E_u	机床空载运行模式阶段总能耗,即空载能耗
E_{jm}^c	在机床 m 上加工工件 j 时的切削能耗
E_{jm}^a	在机床 m 上加工工件 j 时的负载能耗
P_{jm}^u	在机床 m 上加工工件 j 时的空载功率
E_a	机床辅助系统能耗(如液压系统、冷却和润滑系统及控制系统等)
E_s	机床启动能耗
X_{jn}^m	一个整数变量,它有两个可能的值:0或1。如果在机床 m 上加工工序 O_{jn} ,则设置为1;否则设置为0。

1.3 模型建立

假设柔性作业车间中有 J 个工件, M 台机床。由文献[6]给出的制造系统能量平衡方程可知,机床处于运行模式时的总能耗 E_p 可分为四部分:切削能耗 E_{jm}^c 、负载能耗 E_{jm}^a 、维持系统正常运行的基本能耗 E_b 和机床辅助系统能耗 E_a ,其表达式为:

$$E_p = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{jn}^m (E_{jm}^a + E_{jm}^c) + E_b + E_a \quad (1)$$

机床的负载功耗受实际负载的影响,在允许的负载范围内,负载功率 $P_{jm}^a(t)$ 与切削功率 $P_{jm}^c(t)$ 之间的关系可表示为:

$$P_{jm}^a(t) = \delta P_{jm}^c(t) \quad (2)$$

式中: δ —负载功耗系数。

故有:

$$E_{jm}^a = \delta E_{jm}^c \quad (3)$$

维持机床正常运行的基本能耗 E_b 可表示为:

$$E_b = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{jn}^m P_{jm}^u T_{jm} \quad (4)$$

将式(3~4)代入式(1)可得:

$$E_p = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{jn}^m [(1 + \delta) E_{jm}^c + P_{jm}^u T_{jm}] + E_a \quad (5)$$

当机床处于空转运行模式时,装载或卸载工件、定位、夹紧以及更换刀具,将消耗大量能量 E_u (即空载能耗)。 E_u 可表示为:

$$E_u = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M (S_{(j+1)m} - C_{jm}) X_{jn}^m P_{jm}^u \quad (6)$$

在实际加工过程中,机床通常处于 4 种状态:启动、空载、加工和停止状态^[7]。

文献[8]给出了一般机床加工过程中的功率分布曲线,如图 1 所示。

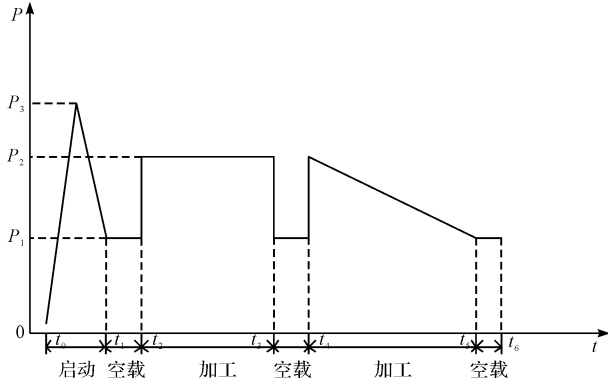


图 1 机床功率曲线

当机床处于不同状态时,其能源消耗值不同。根据式(5 ~ 6),车间制造系统的总能耗为:

$$E_{total} = E_s + E_u + E_p \quad (7)$$

本课题研究的车间调度模型的优化目标为总能耗(f_1)以及总完工时间(f_2)。其具体数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f_1 = E_{total} \\ \min f_2 = \max \sum_{m=1}^J C_{jm} \end{cases} \quad (8)$$

受到的约束为:

$$T_{max} \geq C_{jm}, j \in J, m \in M \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{jm}^m = 1, j \in J \quad (10)$$

$$C_{jm} = S_{jm} + X_{jm}^m T_{jm}, j \in J, m \in M \quad (11)$$

$$C_{jm} \leq S_{jk}, m, k \in M, m \neq k, j \in J \quad (12)$$

$$C_{jm} \leq S_{(j+1)m}, j \in J, m \in M \quad (13)$$

其中,约束(9)定义最大完工时间等于最后一个工件的完成时间;约束(10)表示每个工件的每道工序只能分配给一台机床;约束(11)表示工件 j 在机床 m 上的完工时间 C_{jm} ,由工件 j 在机床 m 上的起始时间 S_{jm} 和加工时间 T_{jm} 组成;约束(12)给出了工件 j 的加工工序之间的优先约束,即工件在当前阶段完成某道工序之后,才能在下一个生产阶段处理下一道工序;约束(13)确保一台机器只有在完成当前工件后,才能处理下一个工件。

上述数学模型是具有约束的多目标函数。尽管在多目标优化问题(MOP)中,没有最优或近似最优解,但是可以获得在最大完工时间和总能耗之间进行权衡的一组帕累托最优解。解决 MOP 有很多种方法,其中最著名的是目标加权法^[9-11]。其将时间和能耗归一化

后加权求和,寻最优解。 f_i^K 是遗传算法进化至 K 代的第 i 个目标函数,本文中两个目标函数可表示为:

$$U(K) = \alpha f_1^K + (1 - \alpha) f_2^K \quad (14)$$

式中: α —能耗权值。

决策者根据对各目标的偏好,对 α 进行取值,通过将不同的标准值标准化为可比较的单位,以相同的比例评估所有目标。因此,归一化赋权值优化目标函数为:

$$U(K) = \alpha f_1^K + (1 - \alpha) f_2^K \quad (15)$$

式中: f_1^K, f_2^K — f_1, f_2 的归一化值。

每个归一化目标 f_i^K 定义为:

$$f_i^K = \frac{f_i^K - f_{i,\min}^K}{f_{i,\max}^K - f_{i,\min}^K} \quad (16)$$

式中: $f_{i,\min}^K, f_{i,\max}^K$ —目标函数 f_i^K 的给定最小、最大值。

2 多层编码遗传算法

遗传算法(GA)是一种随机搜索算法,使用现有信息指导搜索过程,通过估计染色体的适应度执行选择、交叉、变异等其他遗传操作^[12-13],收敛到最佳或令人满意的解。

染色体表示问题中潜在的最优解。在解决较复杂问题时,单一的染色体无法准确表达问题的解。本文对 MOFJSP 环境下的遗传算法进行改进,采用多层编码策略,将个体的编码分为多层,每层的编码表示不同的含义,使多层编码相互作用,求解整个问题的解,实现用单一的染色体表达复杂问题的解的目的。

2.1 编码策略

本文提出的编码方式为整数编码,工件加工工序编码如表 2 所示。

表 2 工件加工工序编码(片段)

工件加工工序	1	3	2	1	2	1
机床编码	1	3	3	2	3	1

该染色体的编码主要分为两层,第一层为工件工序的加工顺序;第二层为每道工序对应的加工机床。

第一层中,使用相同的数字来表示相同的工件,并且根据它们在编码中出现的顺序,来确定工件工序,如第 1 次出现“1”,表示第 1 个工件的第 1 道工序“1-1”,第 2 次出现“1”,表示第 1 个工件的第 2 道工序“1-2”,以此类推;

第二层表示各道工序所选择的加工机床的编码,如表 2 中的机床编码 1、3、3、2、3、1 分别表示前面“1-1”工序在机床 1 上加工、“3-1”工序在机床 3 上加工。

2.2 适应度函数

遗传算法中,个体适应程度越高,在下一代被选中的概率越高。通常,适应度与目标函数有关。在本文中,上述目标函数一即方程(15),为适应度函数。

2.3 遗传算法步骤

在 GA 操作阶段,随机产生初始种群,使用基本的遗传操作产生新个体。这 3 个操作详细描述如下:

(1)选择操作。基于个体的适应性,操作者为交叉和变异操作选择的个体适应度通常不是最高的。本文采用轮盘赌法,选择适应性较好的个体,个体被选中的概率与其适应度大小成正比^[14];

(2)交叉操作。交叉算子模拟生物染色体之间的交配重组过程,通过对两条配对染色体中的部分基因,按照一定得交叉概率和交叉方法,生成新的个体;交叉算子是遗传算法的重要特征^[15]。通常交叉概率为0.6~0.9。

本文采用整数交叉法,其操作流程如下:①从种群中随机选取父代中的两个染色体,并取出每个染色体的第一层编码;②随机选择交叉位置进行交叉;③比较交叉前后的个体,将冗余的基因调整为缺失的基因,同

时调整第二层编码,生成新的种群。

(3)变异操作。由于交叉操作不能产生具有新信息的解,为了能够获得具有最大适应度的解,种群需要以指定变异概率执行变异操。一般变异概率为0.001~0.1。

3 实验结果与分析

该多层编码遗传算法在 MATLAB R2016a 环境中实现,在处理器为 Intel i7 8700 3.2 GHz,内存为 16 GB 的计算机上运行。

改进遗传算法参数如表 3 所示。

表 3 改进遗传算法参数

参数名称	值
种群数目	40
最大迭代次数	100
交叉概率	0.8
变异概率	0.05

实验数据来源于文献[16]中的实际生产数据,其中,工件数量 $J=6$,机器数量 $M=6$ 。

加工能耗、加工时间、工序可选择的机床等实例数据如表 4 所示。

表 4 实例数据

工件	工序	加工时间 T_{jm} /平均加工能耗 \bar{e}_p /启动时间 T_s /平均启动能耗 \bar{e}_s /平均空载能耗 \bar{e}_u					
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
J_1	O_{11}	10/3/2/1.52/0.5	15/2.5/1/1.75/0.4		14/2.7/2/1.68/0.41		14/1.5/2/1.45/0.25
	O_{12}		6/3/1/1.75/0.4	4/2.1/3/1.55/0.35	16/2.5/2/1.68/0.41	15/3/1/1.71/0.36	
	O_{13}		5/2.4/1/1.75/0.4			16/2.5/1/1.71/0.36	8/1.7/2/1.45/0.25
	O_{14}	12/2/2/1.52/0.5		13/2/3/1.55/0.35	13/2/2/1.68/0.41		
J_2	O_{21}	15/2.5/2/1.52/0.5		6/1/3/1.55/0.35	16.5/2.2/2/1.68/0.41	11/2.5/1/1.71/0.36	
	O_{22}		15/2/1/1.75/0.4	10/1.5/3/1.55/0.35	7/2.1/2/1.68/0.41		12/1.5/2/1.45/0.25
	O_{23}	5/2.3/2/1.52/0.5		16/1.8/3/1.55/0.35	10/2.3/2/1.68/0.41	14/2.3/1/1.71/0.36	
	O_{24}		10/3/1/1.75/0.4				
J_3	O_{31}	14/2.9/2/1.52/0.5	15/2.7/1/1.75/0.4	6/1.7/3/1.55/0.35	5/2.8/2/1.68/0.41	4/3.1/1/1.71/0.36	
	O_{32}		5/2/1/1.75/0.4	6/2/3/1.55/0.35		16/2.2/1/1.71/0.36	
	O_{33}	5/2.8/2/1.52/0.5	8/2.3/1/1.75/0.4		11/2.9/2/1.68/0.41		15/2/2/1.45/0.25
	O_{34}		6/2.5/1/1.75/0.4	17/2.1/3/1.55/0.35	14/2.5/2/1.68/0.41	12/2/1/1.71/0.36	
J_4	O_{41}	20/3/2/1.52/0.5		19/2/3/1.55/0.35	13/2.5/2/1.68/0.41	15/3/1/1.71/0.36	
	O_{42}		10/2.5/1/1.75/0.4	7/1/3/1.55/0.35	14/2.8/2/1.68/0.41	7/3/1/1.71/0.36	15/2/2/1.45/0.25
	O_{43}	4/2.8/2/1.52/0.5	8/2/1/1.75/0.4				16/2/2/1.45/0.25
	O_{44}	9/3.2/2/1.52/0.5		6/1.6/3/1.55/0.35		6/2.5/1/1.71/0.36	
J_5	O_{51}		6/2.2/1/1.75/0.4		7/2.8/2/1.68/0.41	12/2/1/1.71/0.36	8/0.9/2/1.45/0.25
	O_{52}	8/3/2/1.52/0.5		12/2.7/3/1.55/0.35	16/2.7/2/1.68/0.41		6/1/2/1.45/0.25
	O_{53}	13/2.5/2/1.52/0.5	12/2.3/1/1.75/0.4			16/1.8/1/1.71/0.36	8/0.7/2/1.45/0.25
	O_{54}		4/2/1/1.75/0.4	6/2/3/1.55/0.35	5/3/2/1.68/0.41	12/1.5/1/1.71/0.36	
J_6	O_{61}		11/1.2/1/1.75/0.4			7/1.9/1.71/0.36	8/0.8/2/1.45/0.25
	O_{62}			8/2/3/1.55/0.35	12/3/2/1.68/0.41		6/1/2/1.45/0.25
	O_{63}	10/2.4/2/1.52/0.5	5/1/1/1.75/0.4		13/2.1/2/1.68/0.41	6/2/1.71/0.36	
	O_{64}	16/2.2/2/1.52/0.5		8/1.7/3/1.55/0.35			12/1.1/2/1.45/0.25

由于能耗和完工时间之间的关系,能耗权值 α 由决策者的偏好决定。当决策者想要最小化最大完工时

间时,将能耗权值设置为 $\alpha = 0$ 。在该条件下,采用本文算法,经过 15 次仿真,得出的有效解集如表 5 所示。

表 5 $\alpha = 0$ 时 15 组有效解集

序号	完工时间	总能耗	加工能耗
1	55	507.77	468.40
2	57	469.90	435.70
3	54	530.27	500.80
4	51	458.56	430.80
5	54	472.46	447.00
6	56	531.64	496.50
7	55	513.27	487.40
8	51	492.96	460.80
9	55	514.01	485.70
10	58	517.21	491.00
11	55	507.71	474.20
12	55	503.90	475.70
13	51	546.88	522.20
14	53	435.19	408.60
15	55	506.04	472.20

由表 5 可知:完工时间和能耗之间存在着矛盾关系。当完工时间达到最小值 51 时,对应的能耗最小值为 458.56;当总能耗达到最优值 435.19 时,完工时间增加到 53。故较短的最大完工时间将消耗更多的能量,较高的能耗将缩短最大完工时间。

当决策者想要最小化能量消耗时,将能耗权值设置为 $\alpha = 1$, 同样仿真 15 次后,可得到最小能耗为 331.86, 相比最短完工时间对应的能耗 458.56, 减少了约 127。

双目标赋权值优化结果如表 6 所示。

表 6 双目标赋权值优化结果

方案	能耗权值 α	总能耗	加工能耗	完工时间
1	0	458.56	430.80	51
2	1	331.86	304.80	61

方案 1 的多层编码遗传算法收敛曲线如图 2 所示。

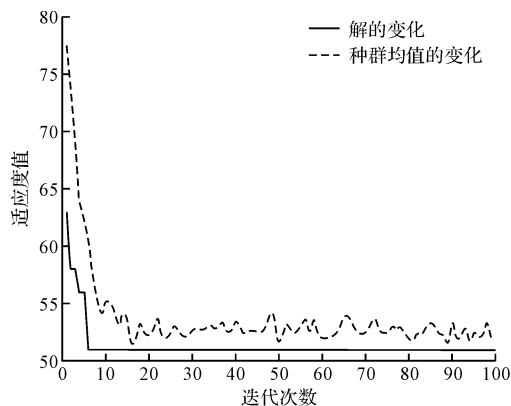


图 2 收敛曲线

由图 2 可知:在迭代次数为 7 时,已快速收敛到最优解,优势个体大量遗传,种群均值变化平缓且不断趋

于最优解,搜索有效稳定。

方案 1 时间最优甘特图如图 3 所示。

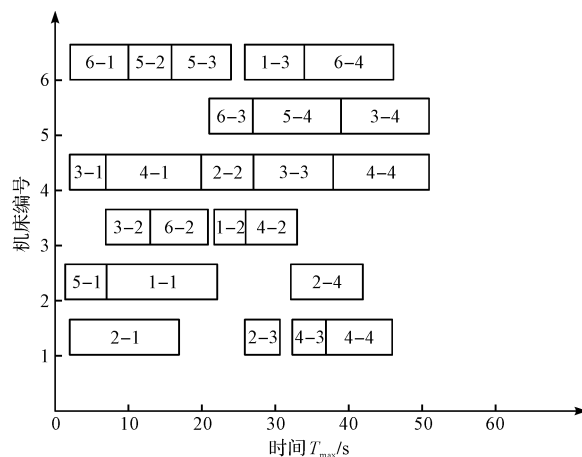


图 3 时间最优甘特图

由图 3 可知:各道工序均匀分布在 6 台机床上,其中,平均加工能耗较大的机床也参与了工件的加工,导致加工能耗较高,达 430.80。

方案 2 能耗最优甘特图如图 4 所示。

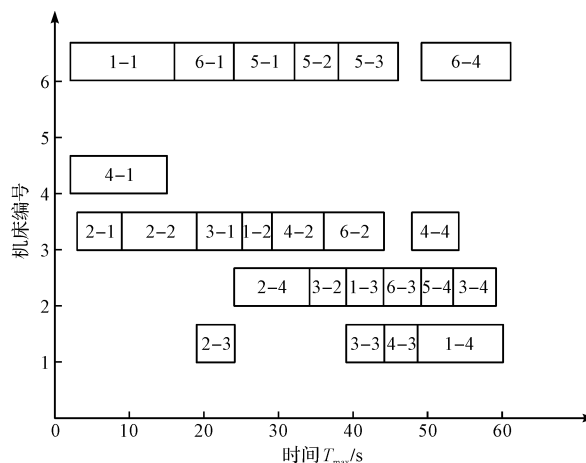


图 4 能耗最优甘特图

由图 4 可知:由于 M2 和 M3 平均加工能耗较低,各道工序集中在这两台机床上加工,加工能耗为 304.80, 比方案 1 减少 126。

以“1 - 3”工序为例,可加工机床有 M2、M5 和 M6。由表 4 可知:M2 的加工能耗最小,故当该工件到达第 3 道工序时,工件流向机床 M2 进行加工。

4 结束语

本文探讨了低能耗柔性作业车间调度问题,为了解决多目标优化问题,对加工工序较多、加工设备较多的柔性工艺路线生产问题提出了多层编码方式;使用目标加权法生成了有效解;针对 MOFJSP,建立了调度模型;最后通过实例仿真,验证了多层编码遗传算法能

够在解空间中识别出一组帕累托最优解。

由于柔性作业车间层能耗源众多,在今后的研究中,可以对车间能耗进行更深入全面的分析。本研究下一步将针对柔性作业车间特点,将 AGV 小车运输能耗、车间照明设备等公共能耗纳入研究对象中,以进一步完善调度模型。

参考文献 (References):

- [1] 肖力. 基于遗传算法的生产调度优化方法研究[D]. 武汉:华中科技大学光子科学与工程学院,2006.
- [2] 何斌,张接信,张富强. 一种求解作业车间调度问题的改进遗传算法[J]. 制造业自动化,2018,40(8):113-117.
- [3] LIU Y, DONG H, LOHSE N, et al. An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2014(65):87-96.
- [4] MANSOURI SA, AKTAS E, BESIKCI U. Green scheduling of a twomachine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption[J]. **European Journal of Operational Research**,2016,248(3):772-788.
- [5] MOUZON G, YILDIRIM M B, TWOMEY J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment[J]. **International Journal of Production Research**, 2007,45(18-19):4247-4271.
- [6] LIU Fei, XU Zong-jun, DAN Bin. Energy performance of machining systems with its application[M]. Beijing: China Machine Press1995.
- [7] 包哲人,徐华. 面向能耗机制的多目标柔性作业车间调度[J]. 计算机应用研究,2017,34(12):3617-3622.
- [8] 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):1344-1346.
- [9] MALAKOOTI B. Systematic decision process for intelligent decision making[J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2011,22(4):627-642.
- [10] MALAKOOTI B. Independent, convergent, and divergent decision behaviour for interactive multiple objectives linear programming[J]. **Engineering Optimization**, 2010,42(4):325-346.
- [11] TANGIAN A. A model for ordinally constructing additive objective functions[J]. **European Journal of Operational Research**, 2004,159(2):476-512.
- [12] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. New York: Addison Wesley,1989.
- [13] MITCHELL M. An introduction to genetic algorithms[M]. Cambridge: MIT Press,1996.
- [14] LIPOWSKI A, LIPOWSKA D. Roulette-wheel selection via stochastic acceptance[J]. **Physica A**, 2012,391(6):2193-2196.
- [15] KAYA M. The effects of two new crossover operators on genetic algorithm performance[J]. **Applied Soft Computing**, 2011,11(1):881-890.
- [16] 陈鸿海,蒋增强,左乐,等. 基于近亲变异 NSGA-II 算法的多目标柔性作业车间调度问题[J]. 农业机械学报, 2015,46(4):344-35.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

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):132-137.

XIE Xiao-han, ZHU Xiao-chun, ZHOU Qi, et al. Scheduling of low energy consumption flexible job shop[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(2):132-137.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>