

考虑多成本约束的柔性作业车间制造资源动态分配模型

关叶青, 朱 颖[†], 谢乃明

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘 要: 针对柔性作业车间多周期生产的设备和人力资源的协同分配问题, 从成本的视角对其进行研究. 综合考虑设备加工成本、人力成本、工件运输成本、库存成本、拖期成本以及外协成本等成本目标, 构建考虑多成本约束的柔性作业车间制造资源动态分配模型, 设计基于遗传算法的模型求解方法; 最后以一个 10 台设备、10 位工人、5 个产品、3 周期阶段的生产需求构造算例, 给出各阶段制造资源优化分配方案和成本结果, 验证了模型与算法的有效性.

关键词: 柔性作业车间; 双资源; 多成本约束; 动态分配; 遗传算法

中图分类号: C93-03; TP301

文献标志码: A

Dynamic allocation model of manufacturing resources in flexible job shop considering multi-cost constraints

GUAN Ye-qing, ZHU Ying[†], XIE Nai-ming

(College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Multi-period allocation of machines and labours in flexible job-shop is studied based on cost. Comprehensively considering the machine processing cost, labor cost, cost of workpiece transportation, inventory cost, backorder cost and outsource cost, a dynamic manufacturing resources allocation model is established. Meanwhile, the solution of the proposed model is designed based on the genetic algorithm. A case where 10 machines and 10 workers are allocated to manufacture 5 different types of products during 3 manufacturing periods is analysed, and the optimal allocation plan is figured out. The result verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: flexible job-shop; dual resources; multiple cost constraints; dynamic allocation; genetic algorithm

0 引 言

随着经济和技术的发展,制造业在全球化背景下面临个性化多样化市场需求的挑战. 为适应市场环境的变化,生产制造系统逐渐由刚性向柔性转变. 对于生产车间,其柔性主要体现于制造资源的使用柔性,即柔性作业车间的制造资源可以用于多个工件的多道工序,而不同制造资源对于同一工序的加工时间和成本有所差异. 因此,在柔性作业车间环境中,如何对车间的制造资源进行合理地分配是实现高效生产的首要前提.

柔性作业车间制造资源分配问题即在不同条件的约束下,将制造资源分配到不同的生产任务中,以实现特定的生产目标. 目前,国内外学者对于该问题的研究多集中于柔性作业车间调度问题. 柔性作业车间调度问题发展于经典车间调度问题. 经典车间

调度问题^[1]起源于 Johnson 对两台机床的流水车间调度问题的提出和解决,而后 Bucker 等^[2]提出了工件的加工工序可以在不同机器上加工,柔性作业车间调度问题首次被提出和解决. 随后,众多学者以该问题为原型,在模型和算法等方面进行扩展和优化. 在模型的构建方面,以最小化最大完工时间为目标构建的数学规划模型是柔性作业车间调度问题的基本模型^[3-6]. 文献 [7-9] 基于基础模型,加入了对瓶颈设备负荷的考虑,将最大设备负载作为另一目标构建模型并求解. 此外,考虑交货期的限制,文献 [10-12] 将最小化拖期的目标加入柔性作业车间调度模型的目标中. 近年来,除了考虑设备资源的约束,学者们逐渐将人力资源约束考虑入柔性作业车间资源分配中,以最小最大完工时间为目标构建了设备与人力双资源约束下的柔性作业车间调度模型^[13-16]. 在算法优化方

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71671090); 航空科学基金项目 (2016ZG52068).

作者简介: 关叶青 (1968—), 女, 副教授, 博士, 从事生产运作管理等研究; 朱颖 (1993—), 女, 硕士生, 从事生产计划与控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: zhuying@nuaa.edu.cn

面,针对构建的柔性作业车间调度模型,各学者提出了分层多空间竞争遗传算法^[17]、两级邻域搜索混合算法^[18]、改进的粒子群算法^[19]、混合变异杂草优化算法^[20]等智能算法进行求解。

与上述模型的视角不同,在柔性作业车间的资源分配问题上,一些学者基于成本视角考虑了在模型的目标函数中加入对生产中产生的成本.文献[21]在模型中加入了对设备加工成本最小化目标的考虑,并设计了混合离散蝙蝠算法;文献[22-24]在设备和人力资源的约束下将生产成本最小化加入目标函数中构建模型,并分别设计了粒子群遗传混合算法、改进的非支配排序遗传算法.然而,上述模型未涉及生产过程中除生产成本外的其他成本,且成本目标与其他目标之间存在量纲差异.文献[25]构建的基于生产费用的柔性作业车间调度优化模型考虑了在制品库存费用、机床工时费、直接工人的工资费用、工件的提前和拖期完工造成的损失费用等多项成本,但未考虑企业在生产能力不足等情况下采取外协措施而产生的外协费用.此外,上述模型多为单阶段的资源分配.然而,在实际生产中,企业在获取多周期的需求量信息的基础上需要完成多周期的制造资源动态分配,仅采用考虑单周期内的资源分配方案难以实现不同周期之间的资源协调,使得总目标难以达成。

综上所述,为贴合生产实际,基于成本的视角实现多周期的柔性作业车间设备及人力的协同分配,本文全面考虑柔性作业车间生产过程中涉及的各项成本,将设备加工成本、人工操作成本、工件运输成本、库存成本、拖期成本以及外协成本等各项成本最小化作为目标,构建在设备和人力双制造资源的加工能力等约束下的柔性作业车间制造资源动态分配模型,并设计相应的遗传算法对模型进行求解。

1 问题描述及模型假设

本文构建的模型为多目标混合整数规划模型,所要解决的柔性作业车间制造资源分配问题描述如下:假设车间配有 M 台设备, L 位工人,在 H 个周期内有 P 类产品需要加工,第 h ($h = 1, 2, \dots, H$) 个周期的产品 P_i ($i = 1, 2, \dots, P$) 需求量为 D_{ih} . 每个产品 P_i 的产出需经过 n_i ($i = 1, 2, \dots, P$) 道工序. 产品的每道工序 O_{ij} ($i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, n_i$) 可以在多台不同的设备中的一台上加工,每台设备 M_m ($m = 1, 2, \dots, M$) 可以由多位工人中的一位操作. 资源分配的目的在于加工过程满足资源能力约束等约束条件的前提下,以设备加工成本、人工操作成本、工件运输成本、外协成本、库存成本、拖期成本

等成本最小化为目标,确定每个周期内每类产品每道工序在每台设备上的生产量、每类产品每道工序的外协量、每道工序的加工设备以及每台设备的操作人员.

模型满足以下假设条件:

- 1) 每周期内各产品的需求已知,各产品的工序顺序确定,不同产品的工序之间没有先后约束;
- 2) 设备均可加工多种工序,不同设备加工某工序的时间及成本不同,且各工序在设备上的切换时间不计;
- 3) 工人均可操作多种设备,不同工人操作某设备的时间不同,其操作成本采取计件工资制;
- 4) 每周期内一位工人仅操作一台设备,一台设备仅由一位工人操作;
- 5) 车间设备的位置固定,工件的工序在不同的设备上加工产生工件的搬运成本;
- 6) 每周期工序允许外协及拖期,每周期末超过需求量的部分视为库存,每周期末不满足需求量的部分视为拖期.

2 柔性作业车间制造资源动态分配模型构建

2.1 决策变量

X_{ijmh} : 第 h 周期产品 i 的工序 j 是否在设备 m 上操作;

Y_{lmh} : 第 h 周期工人 l 是否操作设备 m ;

Q_{ijmh} : 第 h 周期产品 i 的工序 j 在设备 m 上的生产量;

S_{ijh} 为第 h 周期产品 i 的工序 j 外协的数量;

I_{ijh} 为第 h 周期产品 i 的工序 j 完成后的库存数量.

2.2 参数设置

H : 计划生产周期数;

P : 计划生产产品种类总数;

M : 车间可用的设备总数;

n_i : 产品 i 的总工序数;

L : 车间可用的工人总数;

D_{ih} : 第 h 周期产品 i 的需求量;

t_{ijm}^M : 产品 i 的工序 j 在设备 m 上加工所需时间;

α_{ijm} : 产品 i 的工序 j 在设备 m 上加工的单位时间成本;

t_{lm}^L : 工人 l 在设备 m 上完成一道工序操作所需的时间;

β_l : 工人 l 完成一道工序的薪酬;

δ_{ij} : 产品 i 的工序 j 的单位外协成本;

η_i :产品*i*的单位库存成本;
 θ_i :产品*i*的单位拖期成本;
 γ_{ij} :产品*i*的工序*j*在设备之间的单位距离运输成本;
 d_{mn} :设备之间的距离;
 T_m^M :设备*m*的工作能力;
 T_l^L :工人*l*的工作能力;
 M^∞ :无穷大的数.

2.3 模型构建

根据上述描述构建如下柔性作业车间制造资源动态分配模型:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{m=1}^M X_{ijmh} Q_{ijmh} t_{ijm}^M \alpha_{ijm} + \\ & \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M Y_{lmh} \beta_i \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} X_{ijmh} Q_{ijmh} \right) + \\ & \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} \gamma_i d_{m_{ij} m_{i,j+1}} Q_{m_{ij} m_{i,j+1} h} + \\ & \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} \delta_{ij} S_{ijh} + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^P \eta_i I_{in_i h}^+ + \\ & \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^P \theta_i I_{in_i h}^- \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} X_{ijmh} Q_{ijmh} t_{ijm}^M \leq T_m^M, \forall m, h; \tag{2}$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{lmh} \beta_i \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{n_i} X_{ijmh} Q_{ijmh} \right) \leq T_l^L, \forall l, h; \tag{3}$$

$$\sum_{l=1}^L Y_{lmh} \leq 1, \forall m, h; \tag{4}$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{lmh} \leq 1, \forall l, h; \tag{5}$$

$$\prod_{l=1}^L Y_{lmh} = \lambda_M, X_{ijmh} \leq M^\infty \lambda_M, \forall m, h; \tag{6}$$

$$\prod_{j=1}^{n_i} \left(\sum_{m=1}^M \right) = \lambda_Q, Q_{ih} \leq M^\infty \lambda_Q, \forall i, h; \tag{7}$$

$$I_{ijh} = I_{ij(h-1)} + S_{ijh} + Q_{ijh} - (S_{i,j=1h} + Q_{i,j+1h}), \forall i, j \in [1, n_i], h; \tag{8}$$

$$I_{ij0} = 0, \forall i; \tag{9}$$

$$I_{ijh} \geq 0, \forall i, j \in [1, n_i], h; \tag{10}$$

$$I_{in_i h} = I_{in_i(h-1)} + S_{in_i h} + Q_{in_i h} - D_{ih}, \forall i, h; \tag{11}$$

$$I_{in_i h} = 0, \forall i; \tag{12}$$

$$I_{in_i h}^+ \geq I_{in_i h}, I_{in_i h}^- \geq -I_{in_i h}, \forall i, h; \tag{13}$$

$$X_{ijmh}, Y_{lmh} \in 0, 1, Q_{ijmh}, S_{ijh} \geq 0. \tag{14}$$

该模型的目标为确定每周期内设备的操作人员、加工任务、加工量和外协量,使得生产过程涉及的6项成本最小.其中:式(1)中第1项表示设备加工成本;第2项为人工操作成本;第3项为工件在设备间的运输成本;第4项为外协成本;第5项为生产周期末的库存总成本;第6项则为生产周期末的拖期总成本.式(2)~(14)为模型的约束条件.其中:式(2)和(3)为制造资源能力约束,式(2)表示对于每一台设备,在每周期内总加工时间不超过给定的总工作时间;式(3)则表示对于每一位工人,在每周期内总加工时间不超过给定的总工作时间.式(4)~(13)为逻辑约束,式(4)和(5)表示一人一机的假设;式(6)表示当设备未被指派相应的操作人员时,设备则无法进行生产;式(7)表示对于每道工序,只有当为其指派了相应的设备和人力资源,该工序才可以进入生产;式(8)~(10)表示在每周期生产过程中的在制品库存量满足的等式关系以及数值约束;式(11)~(13)分别为成品库存满足的等式关系、初始值设置以及与拖期量的关系;式(14)表示决策变量满足的数值约束.

3 柔性作业车间制造资源动态分配模型求解

对于所要构建的混合整数规划模型,本文基于遗传算法的思想设计相应的智能算法.模型求解的算法流程如图1所示.算法主要分为如下4个主要部分:

1) 生成初始种群.将模型的4个决策变量 X_{ijmh} 、 Y_{lmh} 、 Q_{ijh} 、 S_{ijh} 视为种群的4条染色体并对其进行编码.其中染色体 X_{ijmh} 、 Q_{ijh} 和 S_{ijh} 中的每类产品所对应的部分被视为染色体中的一条基因.随机生成符合约束条件的 N 个初始种群.

2) 基因交叉.将现有种群视为父代种群,随机选取两个父代种群,将两个种群对应的每条染色体上的基因进行随机交叉,形成子代种群.在所有新产生的子代种群中剔除不符合约束条件的种群,而后将新旧种群合并.

3) 种群筛选.将模型的目标函数作为各种群的适应度函数,计算合并后的种群的目标函数值;将目

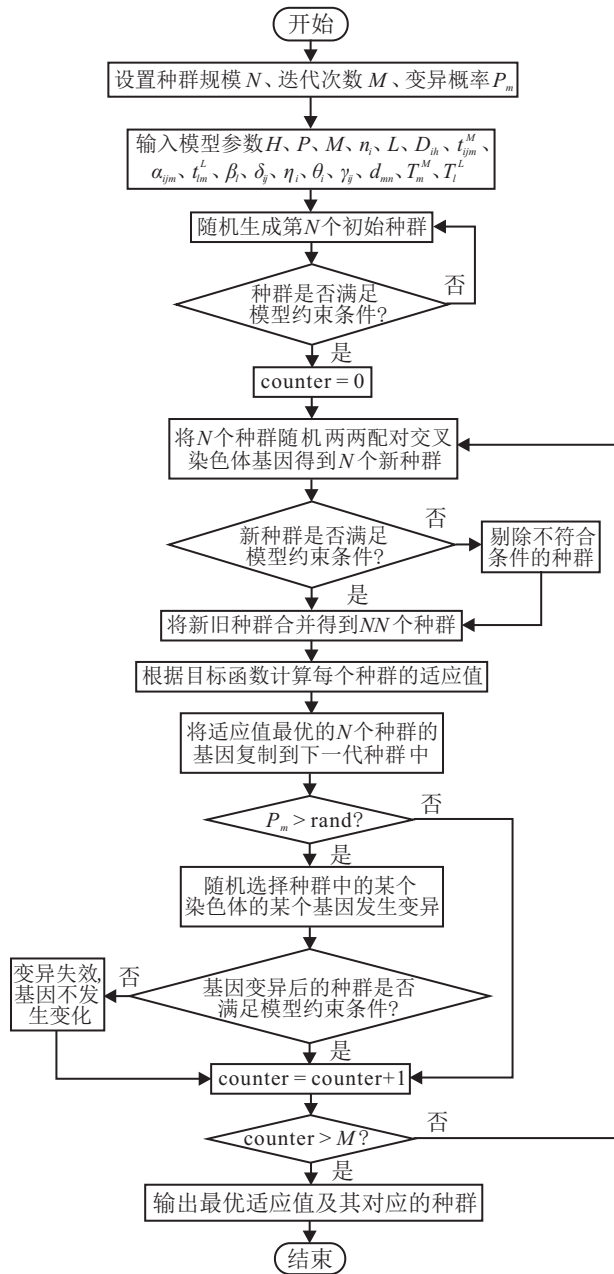


图1 模型求解算法流程图

标函数值最小的 N 个种群的染色体复制至下一代种群中。

4) 基因突变. 根据一定的概率, 在每个种群中随机选择一条染色体上的某个基因进行随机变异, 并检测变异后的种群是否符合约束条件. 若符合, 则保留变异基因; 若不符合, 则变异无效。

最后, 经过 M 次遗传得到最优种群, 最优种群的 4 条染色体即为模型的最优解。

4 案例分析

根据已构建的柔性作业车间制造资源分配模型, 以某机加工企业的柔性作业车间制造资源的分配问题为例, 验证模型和算法的实用性和有效性, 并为该机加工企业的柔性作业车间制造资源分配问题提供

最优分配方案。

4.1 原始数据

某机加工企业现需要在 3 个生产周期内加工 5 类产品 $P_1 \sim P_5$, 每类产品对应特定的加工工序. 每周各类产品的需求量及相关成本参数如表 1 所示. 该企业的柔性作业车间现有 10 台生产设备, 其中 $M_1 \sim M_3$ 为专用设备, 可加工少数特定的工序; $M_4 \sim M_{10}$ 为通用设备, 可加工多种不同的工序, 其加工效率有所差异. 每台设备对应不用工序的加工时间、加工成本及每台设备的加工能力如表 2 所示. 10 台设备固定放置于车间的不同位置, 其间隔的距离如表 3 所示. 同时, 车间配有 10 位操作工人 $L_1 \sim L_{10}$, 每位工人可操作的设备不同, 且操作效率有所差异. 每位工人可操作的设备及操作时间如表 4 所示. 对工人采取计件工资制, 工人每完成一道工序获得的酬劳为 2 元。

表1 产品周期需求量、单位外协成本、工件运输成本、库存成本及拖期成本参数

P_i	O_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	η_i	θ_i	D_{ih}		
						D_{i1}	D_{i2}	D_{i3}
P_1	O_{11}	9	0.5			150	200	180
	O_{12}	10	0.5	2	30			
	O_{13}	8	—					
P_2	O_{21}	9	1			160	180	150
	O_{22}	8	—	2	20			
P_3	O_{31}	9	1			120	140	160
	O_{32}	10	—	1	22			
P_4	O_{41}	10	0.5			100	150	200
	O_{42}	9	0.5	2	30			
	O_{43}	8	—					
P_5	O_{51}	8	1			180	130	150
	O_{52}	10	—	1	21			

表2 设备间固定距离

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
M_1	0	1	2	3	2	1	2	1	3	1
M_2	1	0	3	2	1	3	3	3	2	2
M_3	2	3	0	2	3	2	1	3	2	3
M_4	3	2	2	0	1	2	2	1	2	3
M_5	2	1	3	1	0	3	2	2	1	2
M_6	1	3	2	2	3	0	3	2	1	2
M_7	2	3	1	2	2	3	0	3	3	1
M_8	1	3	3	1	2	2	3	0	3	3
M_9	3	2	2	2	1	1	3	3	0	2
M_{10}	1	2	3	3	2	2	1	3	2	0

表3 设备加工时间、加工成本及加工能力参数

P_i	O_{ij}	$t_{ijm}^M (N_{ijm})$									
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
P_1	O_{11}	0.42(5.8)	—	—	0.48(5.2)	—	0.50(5.0)	—	0.37(6.3)	0.32(6.8)	0.34(6.6)
	O_{12}	—	0.53(4.7)	—	0.55(4.5)	0.57(4.3)	—	0.45(5.5)	—	0.38(6.2)	—
	O_{13}	—	—	0.48(5.2)	—	0.54(4.6)	0.56(4.4)	0.42(5.8)	0.38(6.2)	—	0.33(6.7)
P_2	O_{21}	0.44(5.6)	—	—	0.52(4.8)	—	0.54(4.6)	—	0.35(6.5)	0.30(7.0)	0.32(6.8)
	O_{22}	—	0.30(7.0)	—	0.34(6.6)	0.32(6.8)	—	0.28(7.2)	—	0.25(7.5)	—
P_3	O_{31}	0.56(4.4)	—	—	0.60(4.0)	—	0.63(3.7)	—	0.50(5.0)	0.44(5.6)	0.46(5.4)
	O_{32}	—	—	0.52(4.8)	—	0.55(4.5)	0.58(4.2)	—	0.46(5.4)	—	0.43(5.7)
P_4	O_{41}	0.43(5.7)	—	—	0.51(4.9)	—	0.53(4.7)	—	0.34(6.6)	0.39(7.1)	0.31(6.9)
	O_{42}	—	—	0.45(5.5)	—	0.48(5.2)	0.50(5.0)	—	0.42(5.8)	0.39(6.1)	0.37(6.3)
	O_{43}	—	0.38(6.2)	—	0.42(5.8)	0.43(5.7)	—	0.35(6.5)	—	0.32(6.8)	—
P_5	O_{51}	—	0.50(5.0)	—	0.53(4.7)	0.55(4.5)	—	0.48(5.2)	—	0.4(5.5)5	—
	O_{52}	—	—	0.46(5.4)	—	0.52(4.8)	0.54(4.6)	0.40(6.0)	0.36(6.4)	—	0.31(6.9)
T_m^M		80	80	80	80	80	80	80	80	80	80

表4 工人操作时间及加工能力参数

L_l	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	T_l^L
L_1	0.35	—	0.40	—	—	0.45	—	0.50	—	0.42	75
L_2	0.32	0.28	—	0.38	—	—	—	—	0.40	—	75
L_3	0.38	0.35	0.42	0.40	0.39	0.46	0.42	0.51	0.40	0.43	75
L_4	—	0.30	0.38	—	0.42	—	0.40	—	—	—	75
L_5	0.35	0.32	—	0.37	—	—	—	—	0.42	—	75
L_6	0.36	—	0.38	—	—	0.42	—	0.45	—	0.44	75
L_7	0.42	0.36	0.40	0.38	0.40	0.43	0.44	0.47	0.38	0.41	75
L_8	0.33	0.36	—	0.35	—	—	—	—	0.38	—	75
L_9	—	0.38	0.35	—	0.40	—	0.38	—	—	—	75
L_{10}	—	0.34	0.38	—	0.38	—	0.36	—	—	—	75

4.2 计算结果

将模型对应的各项参数输入由MATLAB编程的算法程序后,得到各代适应度平均值和最优值的收敛曲线如图2和图3所示.可以看出,曲线最终趋于稳定,在稳定状态时得到的各周期最优制造资源分配方案如表5~表7所示.

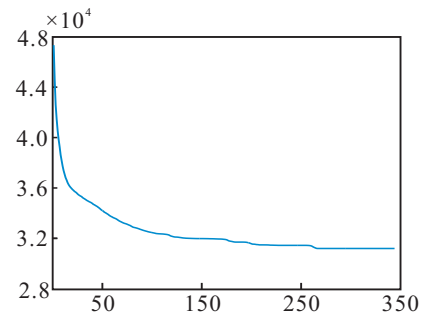


图2 各代适应度平均值收敛曲线

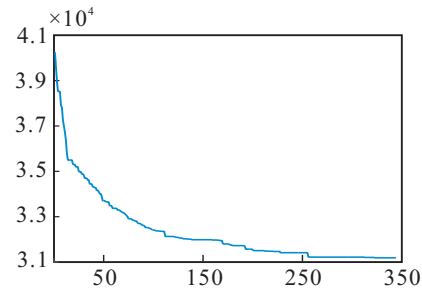


图3 各代适应度最优值收敛曲线

表5 第1周期制造资源分配方案

P_i	O_{ij}	Q_{ijm}										Q_{ij}	S_{ij}
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}		
P_1	O_{11}	47	0	0	63	0	10	0	42	13	0	175	0
	O_{12}	0	22	0	0	10	0	51	0	32	0	115	58
	O_{13}	0	0	20	0	0	10	20	10	0	95	155	10
P_2	O_{21}	37	0	0	27	0	27	0	27	20	0	138	35
	O_{22}	0	84	0	56	3	0	10	0	20	0	173	0
P_3	O_{31}	42	0	0	0	0	28	0	24	28	0	122	21
	O_{32}	0	0	50	0	0	33	0	15	0	33	131	0
P_4	O_{41}	21	0	0	0	0	21	0	30	30	11	113	0
	O_{42}	0	0	28	0	0	10	0	14	0	14	66	45
	O_{43}	0	38	0	25	12	0	15	0	12	0	102	0
P_5	O_{51}	0	40	0	0	50	0	30	0	40	0	160	27
	O_{52}	0	0	34	0	73	0	48	0	0	24	179	0
L_1		L_2	L_4	L_9	L_5	L_{10}	L_1	L_3	L_6	L_8	L_7	—	—

表6 第2周期制造资源分配方案

P_i	O_{ij}	Q_{ijm}										Q_{ij}	S_{ij}
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}		
P_1	O_{11}	117	0	0	10	0	10	0	10	30	10	187	47
	O_{12}	0	70	0	37	27	0	46	0	36	0	216	16
	O_{11}	0	0	10	0	0	26	23	66	0	30	155	85
P_2	O_{21}	0	0	0	13	0	0	0	4	13	8	38	156
	O_{22}	0	20	0	33	50	0	50	0	14	0	167	0
P_3	O_{31}	28	0	0	10	0	28	0	41	0	21	128	35
	O_{32}	0	0	60	0	40	20	0	0	0	40	160	0
P_4	O_{41}	26	0	0	27	0	18	0	0	27	8	106	55
	O_{42}	0	0	29	0	43	14	0	24	0	43	153	0
	O_{43}	0	30	0	15	0	0	30	0	45	0	120	42
P_5	O_{51}	0	38	0	12	8	0	8	0	12	0	78	44
	O_{52}	0	0	39	0	0	26	39	13	0	13	130	0
L_l		L_8	L_2	L_{10}	L_7	L_4	L_1	L_9	L_6	L_5	L_3	—	—

表7 第3周期制造资源分配方案

P_i	O_{ij}	Q_{ijm}										Q_{ij}	S_{ij}
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}		
P_1	O_{11}	67	0	0	0	0	0	0	0	0	67	134	0
	O_{12}	0	50	0	16	16	0	33	0	16	0	131	0
	O_{11}	0	0	0	0	0	10	31	41	0	10	92	33
P_2	O_{21}	25	0	0	30	0	0	0	25	22	20	122	1
	O_{22}	0	41	0	27	41	0	41	0	0	0	150	0
P_3	O_{31}	20	0	0	38	0	25	0	12	12	25	132	3
	O_{32}	0	0	20	0	0	101	0	14	0	10	145	0
P_4	O_{41}	0	10	0	40	0	0	20	0	75	0	145	0
	O_{42}	0	0	20	0	0	101	0	14	0	10	145	0
	O_{43}	0	10	0	40	0	0	20	0	75	0	145	0
P_5	O_{51}	0	13	0	0	10	0	68	0	61	0	152	0
	O_{52}	0	0	76	0	76	0	0	0	0	0	152	0
L_l		L_5	L_9	L_7	L_8	L_4	L_1	L_{10}	L_3	L_2	L_6	—	—

表8 3种情境案例最优结果对比

项目	总成本	设备成本	人工成本	库存成本	拖期成本	外协成本	运输成本
原模型结果	31 186	11 478	9 654	241	1 272	6 650	1 891
无拖期结果	31 875	11 178	9 414	256	0	9 111	1 916
无外协结果	58 744	8 626	7 304	0	41 713	0	1 101

4.3 结果分析

1) 考虑多成本约束的必要性.

本文将不考虑拖期和两种不考虑外协的3种情境与原模型进行对比,求解得到的3种情境下最优资源分配方案的总成本及各项成本如表8所示.由上述制造资源分配结果可以看出,人工成本与设备成本在总成本所占的比重最大且相近.因而,在柔性作

业车间制造资源的分配中,除了设备资源的分配外,人力资源的分配是不可忽视的一项重要工作.此外,通过3种情境的结果对比可以看出,不考虑拖期和两种不考虑外协情境下的总成本均高于原模型所得结果.因此,在模型的目标中加入对外协成本与拖期成本的考虑,可以得到更优化的制造资源分配方案,使得优化方案的总成本最低.

2) 动态分配对制造资源的整体协调作用.

依据每道工序的平均用时及其需求量可以计算出所有设备在每周期内的平均工时需求量,如表 9 所示.由表 9 中设备的工时需求与实际能力设定的对比可以看出,设备资源在第 2 周期和第 3 周期内的实际能力不满足需求,需要各周期期间的资源协调.

表 9 各周期设备工时需求及其实际工时能力

指标	H_1	H_2	H_3
设备工时需求	76	89	94
设备实际能力	80	80	80

根据计算结果中的每周期产品产出量和需求量,可以求得各周期的库存量和拖期量,结果如表 10 所示.由各周期的库存和拖期量可以看出,不同周期不同产品的库存情况和拖期情况有所差异,第 2 周期和第 3 周期的资源能力不足在一定程度上由第 1 周期的资源能力剩余补足.因而,与静态柔性作业车间制造资源分配不同,考虑多周期的制造资源分配使得各周期之间的资源得到综合协调,以达到所有计划周期内的总成本最小的目标.

表 10 最优方案下的各周期库存量与拖期量

P_i	H_1	H_2	H_3
P_1	15	55	0
P_2	13	0	0
P_3	11	31	0
P_4	2	14	-41
P_5	-1	-1	1

5 结 论

针对柔性作业车间多周期生产的设备和人力资源的协同分配问题,本文基于成本视角的研究得到如下结果:

1) 构建了以最小化设备加工成本、工人操作成本、工件设备间运输成本、库存成本、拖期成本、外协成本等成本为目标的动态柔性作业车间制造资源分配模型,并设计了遗传算法对模型进行求解;

2) 以某机加工企业的柔性作业车间的制造资源分配问题为例,通过模型的构建和求解,实现了对多种设备资源和人力资源在三周期内的有效动态分配,验证了模型和算法的有效性;

3) 从成本的视角为柔性作业车间的制造资源分配问题提供合理解决方案,为柔性作业车间的生产管理提供理论依据,便于有效地指导生产实际.

在实际应用中,分配的资源数量和任务数量的增加对算法的求解效率有更高的要求,因而,如何改进现有的模型求解算法以实现大规模的案例数据的处

理是本文未来的研究工作之一.此外,在实际生产中,各种不确定因素导致模型涉及的设备加工时间和工人操作时间等参数往往并非确定的数值,因而考虑不确定因素影响下的柔性作业车间制造资源分配问题是未来研究工作的另一方向.

参考文献(References)

[1] Johnson S M. Optimal two-stage and three-stage production schedules with setup times included[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1954, 1(1): 61-68.

[2] Brucker P, Schlie R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines[M]. New York: Springer-Verlag, 1991: 369-375.

[3] Yazdani M, Amiri M, Zandieh M. Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 678-687.

[4] 薛宏全, 魏生民, 张鹏, 等. 基于多种群蚁群算法的柔性作业车间调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 243-248.
(Xue H Q, Wei S M, Zhang P, et al. Flexible job-shop scheduling based on multiple ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(24): 243-248.)

[5] Cruz-Chávez M A, Martínez-Rangel M G, Cruz-Rosales M H. Accelerated simulated annealing algorithm applied to the flexible job shop scheduling problem[J]. Int Trans on Operational Research, 2015, 24(5): 1119-1137.

[6] 赵敏, 殷欢, 孙隼华, 等. 基于改进人工鱼群算法的柔性作业车间调度[J]. 中国机械工程, 2016, 27(8): 1059-1065.
(Zhao M, Yin H, Sun D H, et al. Flexible job-shop scheduling based on modified artificial fish swarm algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(8): 1059-1065.)

[7] Anilkumar N. A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling problem with limited resource constraints[J]. Int J of Production Research, 2011, 49(8): 2409-2423.

[8] 张静, 王万良, 徐新黎, 等. 混合粒子群算法求解多目标柔性作业车间调调度度问题[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 715-722.
(Zhang J, Wang W L, Xu X L, et al. Hybrid particle-swarm optimization for multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(6): 715-722.)

[9] Karthikeyan S, Asokan P, Nickolas S. A hybrid discrete firefly algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problem with limited resource constraints[J]. The Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(9): 1567-1579.

- [10] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 柔性作业车间多目标动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2629-2637. (Liu A J, Yang Y, Xing Q S, et al. Dynamic scheduling on multi-objective flexible job shop[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(12): 2629-2637.)
- [11] Gao K Z, Suganthan P N, Pan Q K, et al. Pareto-based grouping discrete harmony search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling[J]. Information Sciences, 2014, 289(1): 76-90.
- [12] 赵博选, 高建民, 陈琨. 求解多目标柔性作业车间调度问题的两阶段混合Pareto蚁群算法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 145-151. (Zhao B X, Gao J M, Chen K. Two stage hybrid pareto ant colony algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 145-151.)
- [13] 李兢尧, 孙树栋, 黄媛, 等. 求解双资源约束车间调度问题的继承式双目标遗传算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1761-1767. (Li J Y, Sun S D, Huang Y, et al. Double-objective inherited genetic algorithm for dual resource constrained job shop[J]. Control and Decision, 2011, 26(12): 1761-1767.)
- [14] Lei D, Guo X. Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling[J]. Int J of Production Research, 2014, 52(9): 2519-2529.
- [15] 张国辉, 王永成, 张海军. 多阶段人机协同求解动态柔性作业车间调度问题[J]. 控制与决策, 2016, 31(1): 169-172. (Zhang G H, Wang Y C, Zhang H J. Multi-stage man-machine cooperated scheduling method for dynamic flexible job shop scheduling problem[J]. Control and Decision, 2016, 31(1): 169-172.)
- [16] Zheng X, Wang L. A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem[J]. Int J of Production Research, 2016, 54(18): 1-13.
- [17] Ishikawa S, Kubota R, Horio K. Effective hierarchical optimization by a hierarchical multi-space competitive genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(24): 9434-9440.
- [18] 赵诗奎. 求解柔性作业车间调度问题的两级邻域搜索混合算法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 175-184. (Zhao S K. Bilevel neighborhood search hybrid algorithm for the flexible job shop scheduling problem[J]. J of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 175-184.)
- [19] Teekeng W, Thammano A, Unkaw P, et al. A new algorithm for flexible job-shop scheduling problem based on particle swarm optimization[J]. Artificial Life & Robotics, 2016, 21(1): 18-23.
- [20] 黄霞, 叶春明, 曹磊. 求解多目标作业车间调度问题的混合变异杂草优化算法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 1-8. (Huang X, Ye C M, Cao L. Composite mutation invasive weed optimization algorithm for multi-objective job shop scheduling problem[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(12): 1-8.)
- [21] 徐华, 张庭. 混合离散蝙蝠算法求解多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 201-212. (Xu H, Zhang T. Hybrid Discrete bat algorithm for solving the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. J of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 201-212.)
- [22] 鞠全勇, 朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 148-154. (Ju Q Y, Zhu J Y. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 148-154.)
- [23] 曾强, 沈玲, 任华, 等. 双资源批量生产柔性作业车间多目标调度方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 250-256. (Zeng Q, Shen L, Ren H, et al. Multi-objective scheduling method for batch production FJSP with dual resource[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(1): 250-256.)
- [24] 高丽, 周炳海, 杨学良, 等. 基于多规则资源分配的柔性作业车间调度问题多目标集成优化方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(8): 1191-1198. (Gao L, Zhou B H, Yang X L, et al. A multi-objective optimization method for FJSP based on multi-rule resource allocation[J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(8): 1191-1198.)
- [25] 刘晓霞, 谢里阳, 陶泽, 等. 基于生产费用的柔性作业车间调度优化[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 561-564. (Liu X X, Xie L Y, Tao Z, et al. Flexible job shop scheduling for decreasing production costs[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29(4): 561-564.)

(责任编辑: 孙艺红)