

文章编号:1674-8190(2018)04-551-09

基于改进匈牙利算法的航空企业动态调度方法研究

王晋^{1,2}, 王鹏¹, 郭丰赫¹

(1. 西安航空学院 机械工程学院, 西安 710077)

(2. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 航空零件生产调度时,应尽量满足多目标和实时性的要求。结合某航空制造企业的实际生产情况,提出一种基于“穷尽成对比较”技术和改进匈牙利算法的动态调度方法。首先以航空零件调度时的最大完工时间、生产加工成本以及生产能耗为优化目标,构建柔性作业车间多目标动态调度数学模型;然后利用基于“穷尽成对比较”技术的权重参数调节模型对数学模型中各个目标的权重参数进行实时动态调整;最后以各个目标的加权值为总目标,采用改进匈牙利算法求得工序的最优分配结果。结果表明:与传统的动态调度方法相比,动态调度方法能够有效地提高航空企业的生产效率、减少航空企业的生产加工成本并降低对环境的污染,具有较好的综合调度性能。

关键词: 航空制造企业;多目标;改进匈牙利算法;柔性作业车间;动态调度

中图分类号: TP278

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.013

Method Study on Dynamic Scheduling for Aviation Manufacturing Enterprise Based on the Improved Hungary Algorithm

Wang Jin^{1,2}, Wang Peng¹, Guo Fenghe¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(2. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the actual production situation of aviation manufacturing enterprise, in order to fulfill the multi-objective and real-time requirements of aviation parts in production scheduling, a new dynamic scheduling method is proposed, which based on the technology of “exhaustive paired comparison” and improved Hungary algorithm. Firstly, a flexible job shop dynamic scheduling mathematical model is built with the three factors as the optimization objectives, which are maximum completion time, cost of production and the energy consumption of production. Then, the weights are dynamically adjusted by using the technology of “exhaustive paired comparison”. Finally, an improved Hungary algorithm is proposed to get the assignment scheme between work piece and machine to optimize the total objective. The simulation results show that the proposed dynamic scheduling method improves the productivity of the aviation enterprise, reduce the cost of aviation enterprise production, and reduce the pollution to the environment and has a better comprehensive performance.

Key words: aviation manufacturing enterprise; multi-objective; improved Hungary algorithm; flexible job shop; dynamic scheduling

0 引言

航空零件的加工是一个复杂的制造过程,零件结构多样,标准化程度低,工艺复杂,一个零件需要在多个机器上加工才能完全加工成型。不同种类

的航空零件,在每个机器上加工的时间不同。此外,在航空零件加工过程中,需要将各个航空零件合理地分配给最优的机器,并确定机器加工零件的顺序,从而达到合理利用产品制造资源、更好地完成飞机组装线需求的目的。因此,研究航空制造企业的生产调度模型和方法具有一定的理论意义和工程应用价值。

生产调度在提高车间生产率中扮演着重要的角色。近几十年来,生产调度问题受到广泛关注,尤其是作业车间调度问题(Job Shop Scheduling Problem,简称JSSP)。1976年,M. R. Garey等^[1]证明了JSSP是一个NP难问题。在JSSP中,所有工件在不同的机器上进行加工,每个工件由连续的多道工序组成,每道工序在指定的一台机器上加工,并且每道工序的可加工机器只有一台。和JSSP不同的是,柔性作业车间调度问题(Flexible Job Shop Scheduling Problem,简称FJSSP)允许每道工序可在多台机器上进行加工。以至于FJSSP相对JSSP来说,变得更加复杂和难以解决。通常,柔性作业车间调度需要同时解决两个问题:将每道工序分配到可用的机器上和将每台机器上的工序进行排序并加工。

由于柔性作业车间调度的复杂性,研究人员提出了许多不同的算法来解决此类问题。例如基于规则的调度方法^[2]、变邻域搜索方法^[3]、人工神经网络方法^[4]、禁忌搜索算法^[5]、遗传算法^[6]和粒子群算法^[7]等。然而,上述算法都是用来解决静态的FJSSP,即在进行车间调度时,只要在初始时刻生成调度,那么在生产过程中所有的工件以及机器数量是不可变的,并且工序只要被分配到机器上就肯定会被加工。但是,在实际生产中,车间内经常发生一些不可预知的异常事件。例如,新的紧急订单的加入、机器故障的发生、工人的缺勤等等,这些都会导致先前生成的调度不再适合新的调度环境。因此,柔性作业车间动态调度(Flexible Job Shop Dynamic Scheduling,简称FJSDS)问题受到越来越多的关注。M. Gholami等^[8]通过一种集成仿真和遗传算法的方法来解决随机机器故障的FJSDS问题;A. Rajabinasab等^[9]利用信息素方法,通过建立相应的多代理调度系统,来解决一种工件随机到达、机器故障等异常事件发生的FJSDS问题;T. Ning等^[10]提出了一种仿真模型,应用改善混合

多相粒子群算法来解决FJSDS问题。

尽管针对FJSDS问题已有诸多研究,但对于航空制造企业来说,航空零件具有生产工艺复杂、生产周期长、单件小批量的生产特点,现有的粗放式生产管理方式严重制约着我国航空制造业的发展。虽然企业资源规划、MES等系统已在多数航空加工企业中得到应用,但是航空企业使用传统的FJSDS方法,通常由于调度结果难以解决复杂问题而不能满足需求。具体表现在以下两个方面:

(1)传统的FJSDS方法优化多目标问题主要应用的方法有两种:帕累托优化和基于权重的优化。在帕累托优化中,会生成一些可行解供决策者选择^[11],但决策者从大量的可行解中选取合适的解是一件不容易的事。而在基于权重的多目标优化中,目前多是将各个目标的权重赋予一个固定的值^[12],即各个目标的权重是固定不变的,并不能随着车间的实时状况或者管理者需求的变化而变化。

(2)在传统FJSDS问题中,优化目标很少考虑生产中的能耗。众所周知,全球性的气候问题使人们对环境的关注度越来越高,制造企业作为能源的主要消耗者,各国政府已经陆续制定强制措施,要求制造企业节能减排,以应对全球性的环境污染问题。

因此,基于上述分析以及航空制造企业的特殊性,本文提出一种新的动态调度方法对工序进行实时分配。在此方法中,应用基于“穷尽成对比较”技术的多目标权重参数调节方法来调节动态调度时目标参数的权重。此外,通过对航空企业动态调度过程的分析,将最大完工时间、生产加工成本以及能耗作为优化目标,给出一种基于改进匈牙利算法的FJSDS方法。最后,通过仿真实验验证系统的有效性和可行性。

1 FJSDS的数学模型

1.1 FJSDS描述

一般的,FJSSP分为完全柔性作业车间调度和部分柔性作业车间调度。在完全柔性作业车间调度中,每个工序可以在任何一个机器上进行加工。而部分柔性作业车间调度中,至少有一个工序不能在任意一个机器上进行加工。对于航空制造企业来说,航空零件的加工属于部分柔性作业车间调度。因此,本文研究部分柔性作业车间调度

问题。

部分柔性作业车间调度模型如下:有 n 个航空工件 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ 在 m 台机器 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 上加工。每个航空工件 J_i 有 n_i 道工序 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in_i}\}$ 。按照航空工件的工艺路线要求,每个航空工件的工序具有顺序约束。调度的任务就是将所有工序分配到相应的加工机器并确定工序的开始加工时间,使得优化的目标达到最优。为了建立数学模型,对一些符号和变量定义如表 1 所示。

表 1 符号和变量定义
Table 1 Notations

符 号	描 述
n	航空工件的总数
m	机器的总数
n_i	航空工件 i 的工序总数
$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$	机器集
O_{ij}	航空工件 i 的第 j 个工序
C_{ijk}	工序 O_{ij} 在机器 M_k 上的完工时间
E	生产的总能耗
x_{ijk}	1, 工序 O_{ij} 在机器 M_k 上加工; 否则, 0
P_{0k}	机器 M_k 空闲时刻的功率, kW
P_k	机器 M_k 的切削功率, kW
t_{lk}	机器 M_k 总的空闲时间
t_{ijk}	工序 O_{ij} 在机器 M_k 上的切削时间
F_{ijk}	机器 M_k 加工工序 O_{ij} 的费用成本
F	优化的总目标

航空工件加工过程中一般满足以下条件:

- (1) 每台机器在同一时刻最多只能加工一道工序;
- (2) 每道工序同一时刻最多只能被一台机器加工;
- (3) 航空工件的加工过程需符合预先给定的工艺路线要求,同一个航空工件的不同工序不能同时加工;
- (4) 工序一旦开始加工不能中断,直至加工完成,除非机器发生故障;
- (5) 各个航空工件之间相互独立,不存在顺序约束,相互之间没有优先级差别;
- (6) 在零时刻,所有机器的初始状态均为空闲可用。

1.2 数学建模

本文从航空制作企业生产实际和“绿色制造”出发,分别从最大完工时间、生产加工成本、生产能

耗三个方面建立优化目标。

(1) 最小化最大完成时间

$$F_1 = \min f_1 = C_M = \text{Makespan} = \max_{i \in [1, n], j \in [1, n_i], k \in [1, m]} C_{ijk} \quad (1)$$

(2) 最小化加工成本

$$F_2 = \min f_2 = A = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (t_{ijk} x_{ijk} F_{ijk}) \quad (2)$$

(3) 最小化生产能耗

$$F_3 = \min f_3 = E = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (P_k t_{ijk} x_{ijk}) + \sum_{k=1}^m (P_{0k} t_{lk}) \quad (3)$$

并满足约束条件:

$$C_{i,j,k} \leq C_{i,j+1,k} - t_{i,j+1,k} \quad (j = 1, 2, \dots, n_{i-1}) \quad (4)$$

$$C_{i,j,k} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{k \in M(O_{ij})} x_{ijk} = 1 & \forall i, j \\ M(O_{ij}) \subset M & \forall i, j \end{cases} \quad (6)$$

式(1)~式(3)为动态调度优化的三个目标,其中 F_1 的单位为小时, F_2 的单位为百元, F_3 的单位为千瓦时;式(4)保证同一个工件的相邻工序在前一道工序加工完后才能加工下一道工序;式(5)表明每道工序的加工时间都大于零;式(6)保证一道工序只能在一台机器上进行加工。

上述优化目标和约束函数可保证动态调度结果的可行性及有效性,为“绿色生产”提供技术支持。此外,通过基于权重的调度方法,将多目标优化问题转化为单目标优化问题。

即优化总目标为

$$F = \omega_1 \frac{F_1}{F'_1} + \omega_2 \frac{F_2}{F'_2} + \omega_3 \frac{F_3}{F'_3} \quad (7)$$

式中: F'_1 为 1 小时; F'_2 为 1 百元; F'_3 为 1 千瓦时。

2 FJSDS 的调度方法

2.1 FJSDS 方法流程

本文提出一种针对航空制造企业的基于改进匈牙利算法的 FJSDS 方法流程,如图 1 所示。在调度时刻 t ,根据每一个目标的重要程度计算 F 中各个目标权重的参数;根据上述各目标权重参数,计算动态调度系统中可加工工序与可用机器进行匹配时的成本,即总目标 F ,然后采用改进匈牙利

算法寻找工序与机器的最优分配结果。在 $t+1$ 时刻,重复上述过程直到航空工件加工完成。

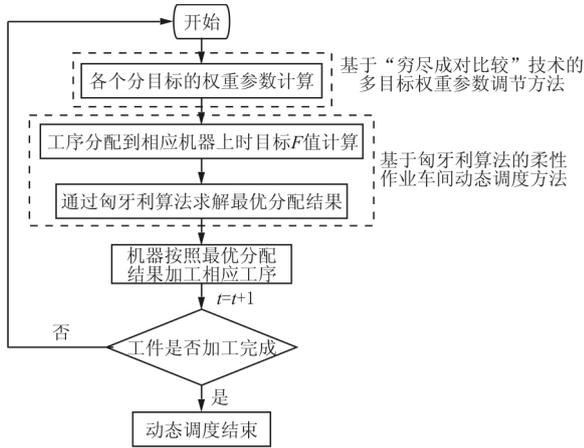


图 1 基于改进匈牙利算法的柔性作业车间动态调度方法流程

Fig. 1 The process of flexible job shop dynamic scheduling method based on the improved Hungary algorithm

2.2 FJSDS 的策略

在 FJSDS 系统中,机器的状态有两种:可用与不可用;而工序的状态有三种:正在加工、已加工、未加工。在真实的航空制造车间,由于不可预知异常事件的发生,前一调度时刻的分配在当前时刻不再最优。并且伴随着机器和工件数量的增多,使得调度计算的复杂度不断增加。因此,本文提出一种动态调度策略对工序进行实时分配,其过程如图 2 所示。在某一时刻 t ,将所有未加工工序中的可加工工序放入任务池中;同时,将机器集中、可用机器挑出,则在 t 时刻的调度问题就是如何将任务池中的工序分配到相应的可用机器上。本文应用“穷极成对比较”技术来实现多目标权重的选择,并利用改进匈牙利算法对任务池中的工序进行分配。

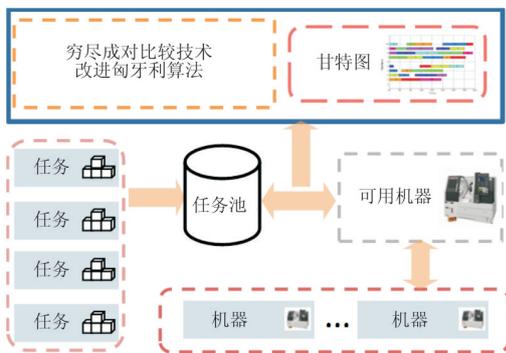


图 2 动态调度的策略

Fig. 2 The dynamic scheduling strategy

3 基于“穷尽成对比较”技术的多目标权重参数调节方法

在进行动态调度时,首先需要确定三个目标 F_z 在总目标 F 中的权重关系。一般对于基于权重的多目标优化,大都会将权重 ω_z 设为固定值,但是此种方法不适用于动态环境下的柔性作业车间调度系统优化。为了应对在实际航空制造过程中异常事件的发生,使调度系统可以根据车间中环境的实时变化而对生产目标进行实时的调整,本文研究一种基于“穷尽成对比较”技术的多目标权重参数调节方法。

设有目标集合 $\{f_1, f_2, \dots, f_p, \dots, f_q, \dots, f_s\}$, 且设 f_{pq} 表示目标 f_p 与目标 f_q 的重要性的比较,则

$$f_{pq} = \begin{cases} 1 & (f_p \text{ 比 } f_q \text{ 重要}) \\ 0.5 & (f_p \text{ 与 } f_q \text{ 同等重要}) \\ 0 & (f_p \text{ 不如 } f_q \text{ 重要}) \end{cases}$$

此处,为了避免某一目标的权重为零,在目标集合中添加一个虚拟目标 f_{s+1} ,则新的目标集合为 $\{f_1, f_2, \dots, f_p, \dots, f_q, \dots, f_s, f_{s+1}\}$ 。

所有的原目标与虚拟目标进行比较,则 $f_{p,s+1} = 1$ ($p=1, 2, \dots, s$)。

可得出所有目标比较值之和:

$$\sum_{p=1}^{s+1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{s+1} f_{pq} = \frac{s(s+1)}{2} \quad (8)$$

各个目标的权重为

$$\omega_p = \frac{\sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{s+1} f_{pq}}{\sum_{p=1}^{s+1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{s+1} f_{pq}} \quad (p=1, 2, \dots, s+1) \quad (9)$$

在本文所提出的三个优化目标中,通过式(7)可将三个优化目标转化为一个单目标问题。则:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{f_{12} + f_{13} + 1}{3 + f_{12} + f_{13} + f_{21} + f_{23} + f_{31} + f_{32}} \\ \omega_2 = \frac{f_{21} + f_{23} + 1}{3 + f_{12} + f_{13} + f_{21} + f_{23} + f_{31} + f_{32}} \\ \omega_3 = \frac{f_{31} + f_{32} + 1}{3 + f_{12} + f_{13} + f_{21} + f_{23} + f_{31} + f_{32}} \end{cases}$$

因此,决策者可根据航空制造企业车间中的实时状态,通过本文提出的基于“穷尽成对比较”技术的多目标权重参数调节方法来调节各个目标的权重参数,使得在进行动态调度时满足车间中管理者的需求,更好地应对未知异常事件。

4 基于改进匈牙利算法的 FJSDS 方法

4.1 基于改进匈牙利算法的动态调度问题目标描述

使用基于匈牙利算法的 FJSDS 目的在于减少航空工件完工时间,提高生产效率,降低航空制造企业成本,同时在动态调度的过程中兼顾对环境的影响。设在 FJSDS 系统中,在时刻 t 车间中有 x 个可加工工序和 y 台可用机器,则该 t 时刻动态调度系统的优化目标为

$$\min(\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y c_{ij} X_{ij}) = \min(c \cdot X) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^x X_{ij} = 1, \sum_{j=1}^y X_{ij} = 1$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, 2, \dots, x \quad j = 1, 2, \dots, y)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1y} \\ \dots & c_{ij} & \dots \\ c_{x1} & \dots & c_{xy} \end{bmatrix}$$

式中: X 为匹配系数矩阵,当机器 j 加工工件 i 时, $X_{ij} = 1$, 否则为 0; C 为动态调度的目标 F 匹配矩阵; c_{ij} 为工件 i 被机器 j 加工时的目标 F 的值。

4.2 算法步骤

式(10)的求解问题可转化为一个二部赋权图的最佳匹配问题,而 khun-Munkres(KM)算法可用来求解二部赋权图,其本质是一种基于匈牙利算法的标号方法。

利用 KM 算法求解 FJSDS 问题时,在某一调度时刻 t ,有以下三种情况:

(1) 当可用机器和可加工工序相同时,直接根据模型进行求解;

(2) 当可用机器大于可加工工序时,则设置虚拟可加工工序,使得可加工工序与可用机器数量相同。由于实际上该调度不会执行,则设置虚拟加工工序的目标 F 值为零;

(3) 当可用机器小于可加工工序时,则设置虚拟可用机器,使可用机器与可加工工序数量相同。

通过以上变换后,即可将二部赋权图转变为完备二部赋权图,通过完备二部赋权图求得最佳匹配。

本文提出的改进匈牙利算法是在 KM 算法上进行改进,在 t 时刻,算法具体步骤如下:

Step1 对于一个完备的二部赋权图 $G = (X, Y)$ 中, X 和 Y 分别表示可用机器集和可加工工序集。对于 X 和 Y 的顶点都赋予一个标号,分别记为 $L(x)$ 和 $L(y)$ 。通过式(11),取 L 为 G 的初始可行点,并执行匈牙利算法,得出 M 为 G_L 的一个匹配。

$$\begin{cases} L(x) = \min\{C(xy) \mid y \in Y\} & (x \in X) \\ L(y) = 0 & (y \in Y) \end{cases} \quad (11)$$

Step2 若 X 的每个点都是饱和的,则 M 为所求的最小权完美匹配;否则取 M 的非饱和点 $u \in X$, 令 $S = \{u\}, T \neq \phi$, 转向 Step3。

Step3 记 $N_L(s) = \{v \mid u \in S, uv \in G_L\}$ 。若 $N_L(s) = T$, 则 G_L 没有完美匹配,转向 Step4, 否则转向 step5。

Step4 调整标记,计算 $a_L = \min\{L(x) + L(y) - C(xy) \mid x \in S, y \in Y - T\}$, 得到一个新的可行点 $H(v)$ 。令 $L = H, G_L = G_H$, 重新给出一个 G_L 的一个匹配 M , 转向 Step1。

$$H(v) = \begin{cases} L(v) - a_L & v \in S \\ L(v) + a_L & v \in T \\ L(v) & v \in S^c \cap T^c \end{cases}$$

Step5 取 $y \in N_L(s) - T$, 若 y 是 M 的饱和点,转向 Step6, 否则转向 Step7。

Step6 设 $xy \in M$, 则令 $S = S \cup \{x\}, T = T \cup \{y\}$, 转向 Step2。

Step7 在 G_L 中的 $u - y$ 路是 M^- 增广路, 设为 P , 并令 $M = M \oplus P$, 转向 Step1。

Step8 若工序与机器的最优匹配不止一个, 也即存在多个最优匹配时, 选取一个目标值 F 为最小的匹配。

Step9 在下一个 $t = t + 1$ 时刻, 重复 Step1 ~ Step8, 直到所有工序加工完成。

基于改进匈牙利算法的工序分配方法如图 3 所示。

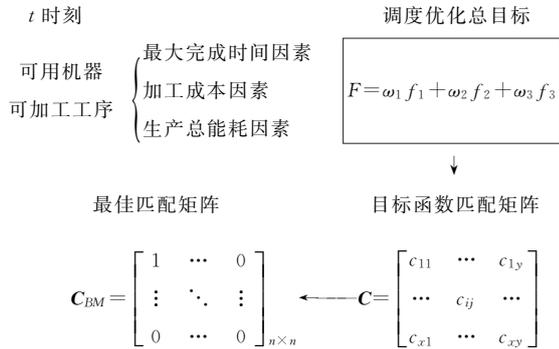


图 3 基于改进匈牙利算法的工序分配方法
Fig. 3 Process allocation method based on improved Hungary algorithm

5 算法实例仿真实验与分析

5.1 实例仿真

针对某航空企业某车间实际的原始数据,经过整理后,给出一个 8×8 的调度问题,如表 2 所示。在此例子中, J_9 作为车间中的异常事件(紧急加单)。符号“—”表示机器不具备加工对应工序的能力。因此,给出的数据为一个部分柔性作业车间的加工数据。为了简化调度问题,本文将符号“—”转变为 999。通过此方法,部分柔性问题就转变为一个完全柔性问题。在表 2 中,行 M_k 和列 O_{ij} 旁边的三个数字(x, y, z)表示第 i 个工件的第 j 个工序在机器 k 上的费用成本是“ x ”,切削时间是“ y ”,切削功率是“ z ”。

某航空企业某车间每一个机器在开机状态且未加工时的空闲功率如表 3 所示。

表 2 加工信息

Table 2 Processing Information

工件	工序	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
J_1	O_{11}	1/5/1.3	1/3/1.8	1/5/3.2	2/3/1.1	1/3/1.1	—	4/10/0.8	2/9/1.1
	O_{12}	2/10/1.3	—	2/5/3.4	3/8/3.2	1/3/0.8	3/9/0.8	4/9/0.9	2/6/1.3
	O_{13}	—	3/10/1.8	—	2/5/1.4	4/6/0.7	1/2/0.9	2/4/1.2	3/5/1.3
J_2	O_{21}	2/5/1.6	4/7/2.1	2/3/2.6	2/9/1.5	1/8/1.2	—	5/9/1.1	—
	O_{22}	—	3/8/2.4	1/5/2.4	1/2/1.6	2/6/1.4	2/7/1.2	2/10/1.3	1/9/1.4
	O_{23}	—	4/10/2.3	—	2/5/1.5	5/6/0.9	2/4/1.8	0.5/1/1.4	3/7/1.3
	O_{24}	3/10/1.4	3/8/1.8	2/9/2.4	4/6/3.2	1/5/0.8	3/7/1.7	—	—
J_3	O_{31}	3/10/2.1	—	—	1/7/1.5	3/6/0.7	4/5/1.6	1/2/1.3	3/4/1.2
	O_{32}	—	2/10/1.9	1/6/2.6	3/4/1.6	2/8/1.2	5/9/1.7	2/10/1.4	—
	O_{33}	0.5/1/1.4	1/4/2.5	2/5/4.2	2/6/1.4	—	2/10/1.3	—	2/5/0.8
J_4	O_{41}	1/3/1.3	0.2/1/2.4	2/6/3.2	1/5/2.1	2/9/1.3	3/7/1.7	5/8/1.3	2/4/1.1
	O_{42}	3/12/1.4	4/11/2.6	3/7/4.2	5/8/3.2	2/10/1.5	3/5/0.8	5/6/1.2	3/9/1.3
	O_{43}	2/4/1.4	4/6/3.7	1/2/3.2	3/10/1.5	2/3/0.8	2/9/0.7	4/5/1.4	2/7/1.8
J_5	O_{51}	1/3/1.3	2/6/1.2	3/7/2.4	4/8/1.2	4/9/0.8	—	4/10/1.3	—
	O_{52}	2/10/1.2	—	3/7/2.8	3/4/2.1	2/9/1.3	5/8/0.7	4/6/1.3	—
	O_{53}	—	3/9/3.2	2/8/3.2	2/7/1.8	1/4/1.2	1/2/1.2	2/7/1.4	—
	O_{54}	2/11/2.1	2/8/1.6	—	2/6/1.7	4/7/1.5	2/5/1.3	2/3/1.3	2/6/1.3
J_6	O_{61}	1/6/1.4	2/7/1.7	0.3/1/4.2	1/4/1.6	2/6/0.8	2/9/1.4	—	3/10/1.3
	O_{62}	4/10/1.3	—	3/9/3.2	2/9/1.4	5/9/0.9	2/7/0.9	1/6/1.3	2/4/1.3
	O_{63}	5/10/1.4	2/5/2.1	4/9/2.4	3/10/1.5	2/11/1.2	—	2/10/1.2	—
J_7	O_{71}	2/5/1.1	2/4/2.2	1/2/3.2	2/6/1.3	4/7/1.3	—	2/10/0.8	—
	O_{72}	—	4/9/2.5	—	5/9/1.4	6/11/0.8	2/9/1.6	2/10/1.3	2/5/1.4
	O_{73}	—	2/8/2.4	4/9/4.2	3/4/1.2	3/8/1.2	2/6/2.1	—	5/10/1.6
J_8	O_{81}	1/2/1.4	1/8/3.2	2/5/2.2	2/9/1.4	—	1/4/1.2	—	3/10/1.8
	O_{82}	2/7/1.3	2/4/1.7	3/7/2.9	4/8/1.4	4/9/1.1	—	2/10/1.3	—
	O_{83}	2/9/1.4	2/9/3.2	—	6/8/1.2	3/5/0.8	5/6/1.3	2/7/1.4	0.5/1/1.3
	O_{84}	4/9/1.7	—	1/3/4.1	4/7/1.2	0.2/1/0.9	2/5/1.4	2/8/0.9	—
J_9	O_{91}	2/3/1.3	2/5/2.4	4.2/4/3.2	3.2/2/1.1	4.2/1/1.1	—	3.2/4/1.6	2.2/2/1.2
	O_{92}	2/2/1.6	2/5/2.3	4.2/10/2	2.2/2/1.2	1.2/3/1.3	2.2/4/1.1	—	3.2/7/1.3
	O_{93}	1/4/1.2	1/3/2.2	4.2/2/3.2	3.2/8/1.3	2.2/5/2.1	3.2/10/1.3	1.2/4/1.3	3.2/2/1.5

表 3 机器空闲时的功率
Table 3 Idle power of machines

M_k	空闲功率/kW	M_k	空闲功率/kW
M_1	0.995	M_5	0.430
M_2	1.485	M_6	0.560
M_3	1.910	M_7	0.470
M_4	0.600	M_8	0.720

在本仿真实验中,假设 f_1 的重要度大于 f_2 的重要度, f_2 的重要度大于 f_3 的重要度,故 $f_{12} = 1$,

$f_{13} = 1, f_{21} = 0, f_{23} = 1, f_{31} = 0, f_{32} = 0$ 。根据本文提出的“穷尽成对比较”技术,可得 $\omega_1 = \frac{1}{2}, \omega_2 = \frac{1}{3}, \omega_3 = \frac{1}{6}$ 。在实际加工过程中,航空企业管理者可以根据需求调整目标的重要度,进而实时地改变目标的权重值。因此,通过表 2 和表 3 中的数据,应用本文提出的改进匈牙利算法可得无异常事件发生时的动态调度结果,如图 4 所示。

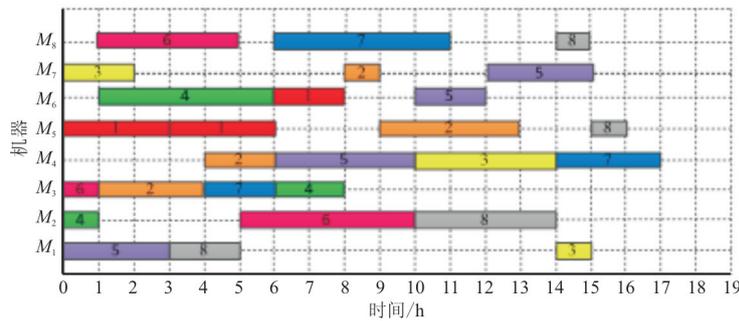
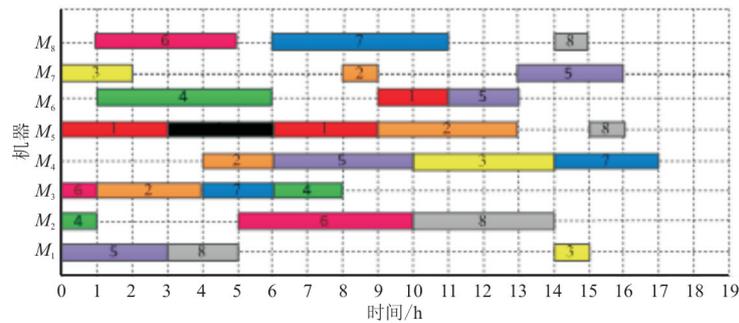


图 4 无异常时动态调度结果

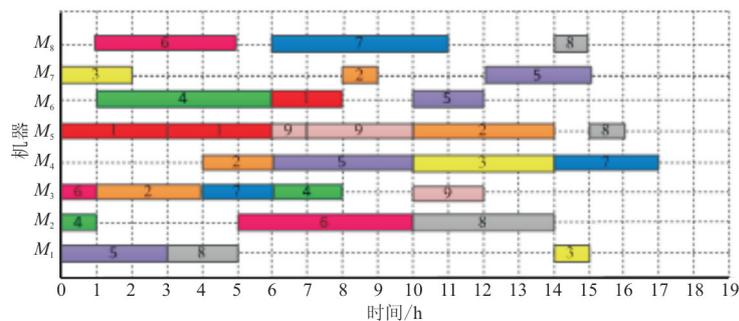
Fig. 4 The result of dynamic scheduling under static condition

为了说明本文在有异常事件发生时动态调度的过程,假设四种异常事件的发生:机器故障、紧急加单、订单取消以及质量问题。具体描述如下:(1) 机器 5 在 $t_1 (t_1 = 3)$ 时刻发生故障,维修好的时间为 $t_2 (t_2 = 6)$;

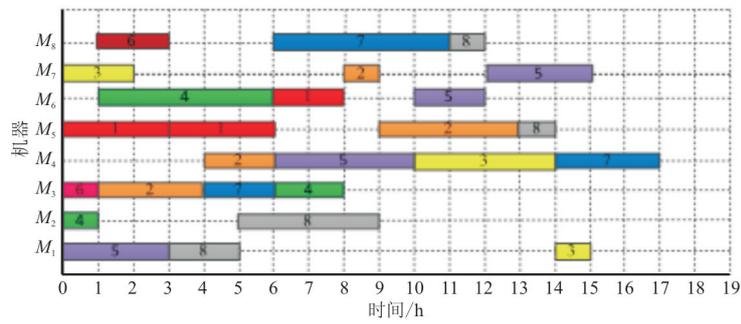
(2) 工件 9 加入在 $t_3 (t_3 = 6)$ 时刻,作为紧急加单加入到未加工工序队列;(3) 工件 6 在 $t_4 (t_4 = 3)$ 时刻被取消加工;(4) O_{22} 在加工完成后被检测出有质量问题,需要重新加工。则通过本文提出的动态调度方法进行动态调度的结果如图 5 所示。



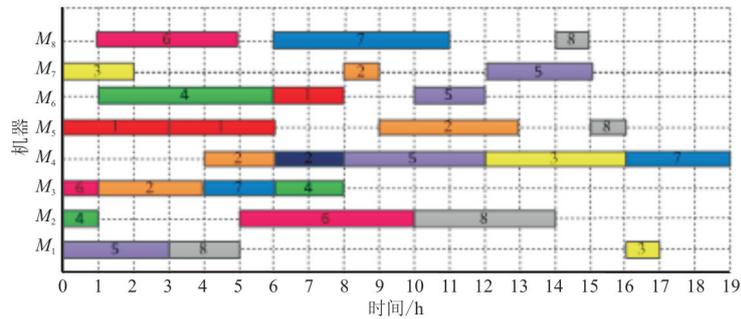
(a) 异常事件—机器故障



(b) 异常事件—紧急加单



(c) 异常事件—订单取消



(d) 异常事件—质量问题

图5 异常事件发生时的动态调度

Fig. 5 Dynamic scheduling in four exceptional conditions

5.2 实验结果比较及分析

(1) 动态调度过程中无异常事件发生

为了验证本文提出的动态调度方法在无异常事件发生时的有效性,将本文提出的方法与现有传统调度方法进行比较,其中包括基于权重的优化方法:AL+CGA^[13]、PSO+TS^[14];以及基于帕累托的优化方法:混合排序免疫模拟算法(HSISAT)^[15]。动态调度结果如表4所示。

表4 各种方法调度结果比较

Table 4 Results of each dynamic scheduling method

方法	C_M/h	A/百元	$E/(kW \cdot h)$
AL+CGA	16	39.3	117.59
PSO+TS	14	38.6	117.67
HSISAT	16	37.2	121.18
本文方法	17	37.2	114.56

从表4可以看出:对于A目标,本文提出的方法优于AL+CGA和PSO+TS两种算法,相对这两种方法,本文提出的方法能够节省生产加工成本最大为5.3%,最小为3.6%;虽然本文提出的方法

得出的 C_M 比其他几种方法稍大,但是本文提出方法得出的 E 为114.56,意味着相比其他三种方法最大提高为5.5%,最小提高2.6%。表明本文提出的基于改进匈牙利算法的动态调度方法在车间生产过程无异常事件发生时是有效的。

(2) 动态调度过程中有异常事件发生

为了验证本文提出的动态调度方法在有异常事件发生时的有效性,将本文的方法与现有传统的动态调度方法进行比较,包括遗传算法+周期性策略调度方法^[16]、基于启发式规则调度方法^[17]。在启发式规则算法中,工序有两种常用的优先权分配规则,包括最短加工时间(SPT)和最大工序剩余(MOPNR)规则。此外,考虑两种机器分配规则(MARs):第一种是将工序分配到具有最小加工时间的机器上(MAR1);第二种是将工序分配到当前机器负荷最小的机器上(MAR2)。为了说明动态调度的过程,设定四种异常事件的发生: M_1 , M_3 , M_6 和 M_8 在时刻 $t_1=4$ 、 $t_2=5$ 、 $t_3=6$ 、 $t_4=7$ 分别发生机器故障,在时刻 $t_5=6$ 、 $t_6=7$ 、 $t_7=8$ 、 $t_8=9$ 四台机器分别开始可用。通过计算,得出对于四种异常事件发生时各个动态调度方法给出的动态调度结

果,如表5所示。

表5 异常事件发生时动态调度结果比较

Table 5 Comparisons of results of dynamic scheduling method in four exceptional conditions

调度方法	C_M/h	A/百元	$E/(kW \cdot h)$
MAR1+SPT	23	98.4	176.47
MAR2+SPT	32	100.5	228.06
MAR1+MOPNR	26	90.3	143.97
MAR2+ MOPNR	37	80.5	266.7
遗传算法+周期性策略	22	76.5	148.45
本文方法	21	52.3	135.67

从表5可以看出:使用传统动态调度方法所得 C_M 的最大值和最小值分别为37和22h,意味着本文提出的方法可以将最大完成时间提高最大43.2%、最小4.8%;本文方法得出的生产加工成本为52.3百元,传统的动态调度方法得出的最好值是76.4百元,最坏的值为100.5百元;此外,本文方法得出的 E 为135.67kW·h,能耗值明显低于传统动态调度方法。

因此,基于以上仿真数据以及对比实验数据可以得出,本文提出的基于改进匈牙利算法的柔性作业车间动态调度方法对于航空企业提高生产率,降低生产成本以及减少能耗是有效、可行的。

6 结 论

改进的匈牙利算法能够解决航空制造企业的动态调度问题,可有效地提高企业的生产效率,通过仿真实验证明,该方法在航空制造车间动态调度中具有有效性和可行性。

目前,对于在航空企业中的动态调度研究主要集中在应用启发式算法进行调度的优化,而对分布式的实时调度研究很少。后续研究的主要方面有:(1)优化模型,添加模型中未考虑的某些因素,例如“绿色生产”中碳排放问题;(2)研究车间中的基于实时数据的动态调度问题,例如运用实时数据进行车间的动态优化。

参考文献

[1] Garey M R, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flow-shop and jobshop scheduling[J]. Mathematics of Operations Research, 1976, 1(2): 117-129.
 [2] Heger J, Branke J, Hildebrandt T, et al. Dynamic adjust-

ment of dispatching rule parameters in flow shops with sequence-dependent set-up times[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(22):6812-6824.

- [3] Xia H, Li X, Gao L. A hybrid genetic algorithm with variable neighborhood search for dynamic integrated process planning and scheduling[M]. U. K.: Pergamon Press, Inc., 2016: 99-112.
 [4] Chan F T S, Chan H K. A comprehensive survey and future trend of simulation study on FMS scheduling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(1): 87-102.
 [5] 余璇, 梁工谦, 董仲慧. 基于混合遗传禁忌搜索算法的多目标柔性作业车间调[J]. 机械制造, 2016, 54(8): 90-93.
 Yu Xuan, Liang Gongqian, Dong Zhonghui. Based on hybrid genetic tabu search algorithm of the multi-objective flexible job shop scheduling[J]. Machinery Manufacturing, 2016, 54(8): 90-93. (in Chinese)
 [6] 陈超, 王艳, 严大虎. 面向能耗的柔性作业车间动态调度研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 2168-2174.
 Chen Chao, Wang Yan, Yan Dahu. Research on dynamic flexible job shop scheduling problem for energy consumption[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2168-2174. (in Chinese)
 [7] Zhang G, Shao X, Li P, et al. An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(4): 1309-1318.
 [8] Gholami M, Zandieh M. Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible job shop[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009, 20(4): 481-498.
 [9] Rajabinasab A, Mansour S. Dynamic flexible job shop scheduling with alternative process plans: an agent-based approach[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9/12): 1091-1107.
 [10] Ning T, Huang M, Liang X, et al. A novel dynamic scheduling strategy for solving flexible job-shop problems[J]. Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing, 2016, 7(5): 1-9.
 [11] Lei D. A Pareto archive particle swarm optimization for multi-objective job shop scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(4): 960-971.
 [12] Bagheri A, Zandieh M, Mahdavi I, et al. An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. Future Generation Computer Systems, 2010, 26(4): 533-541.
 [13] Kacem I, Hammadi S, Borne P. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2002, 60(3): 245-276.
 [14] Xia W, Wu Z. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems

- ence and Technology Management Research, 2016, 36(6): 58-62. (in Chinese)
- [9] 王春青, 贾小漫, 段倩倩. 重大科技项目组织界面协同管理研究[J]. 科技和产业, 2013, 13(3): 1-4.
Wang Chunqing, Jia Xiaoman, Duan Qianqian. A study on collaborative management of major scientific and technology projects organization interfaces[J]. Science Technology and Industry, 2013, 13(3): 1-4. (in Chinese)
- [10] 胡琪波, 蔡建峰, 高智. 航空制造企业新品研发多项目管理研究[J]. 航空制造技术, 2014(11): 68-72.
Hu Qibo, Cai Jianfeng, Gao Zhi. Product research and development project management study aviation manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11): 68-72. (in Chinese)
- [11] 曾军. 加快我国航空项目管理创新的必要性论析[J]. 新经济, 2016(6): 77.
Zeng Jun. To speed up the necessity of China's aviation project management innovation[J]. New Economy, 2016(6): 77. (in Chinese)
- [12] 郭宁生, 黄柯鑫, 王楠楠. 基于知识发现过程的重大基础研究项目发现策略[J]. 中国高校科技, 2018(1/2): 16-19.
Guo Ningsheng, Huang Kexin, Wang Nannan. The countermeasures in major basic research project discovery based KDD process[J]. Chinese University Science & Technology, 2018(1/2): 16-19. (in Chinese)
- [13] 安培浚. 近十年主要国家科技投入与科技绩效评价分析[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(1): 68-74.
An Peijun. Analysis on R&D input and scientific & technological output performance in several main countries during last 10 year[J]. World Sci-Tech R&D, 2017, 39(1): 68-74. (in Chinese)
- [14] 科技部. 国家“十一五”基础研究发展规划[EB/OL]. (2006-10-30) [2018-01-06]. http://www.most.gov.cn/kjgh/kjzgh/200708/t20070824_52690.htm.
Ministry of Science and Technology the People's Republic of China. National "11th Five-Year" basic research development plan[EB/OL]. (2006-10-30) [2018-01-06]. http://www.most.gov.cn/kjgh/kjzgh/200708/t20070824_52690.htm. (in Chinese)
- [15] 赵炳娜. 主动适应科技创新规划新要求(面对面)—专访西北工业大学党委书记张炜[N]. 人民日报, 2016-08-25(17).
Zhao Bingna. Actively adapting to the new requirements of scientific and technological innovation planning (face-to-face)[N]. People's Daily, 2016-08-25(17). (in Chinese)
- [16] 中国项目管理研究委员会. 中国项目管理知识体系[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 332.
PMRC. Chinese project management body of knowledge [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 332. (in Chinese)

作者简介:

- 黄柯鑫(1981—),男,博士,讲师。主要研究方向:项目管理。
郭宁生(1973—),男,博士,副研究员。主要研究方向:科研项目
管理。
黄淮杰(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:项目管理。

(编辑:赵毓梅)

(上接第 559 页)

- [M]. U. K.: Pergamon Press, Inc., 2005.
- [15] Shivasankaran N, Kumar P S, Raja K V. Hybrid sorting immune simulated annealing algorithm for flexible job shop scheduling[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2015, 8(3): 455-466.
- [16] Fang J, Xi Y. A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(3): 227-232.
- [17] Shen X N, Yao X. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems[J]. Information Sciences, 2015,

298: 198-224. (in Chinese)

作者简介:

- 王晋(1985—),男,硕士,讲师。主要研究方向:智能制造系统与生产调度。
王鹏(1983—),男,硕士,讲师。主要研究方向:机械设计与智能制造。
郭丰赫(1997—),男,本科生。主要研究方向:机械电子工程。

(编辑:马文静)