

基于极限学习机的复材热压工段动态调度研究

桂勇¹,冷晟¹,吴纪元¹,阳祥贵²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;

2. 中国航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司,江西 景德镇 333002)

摘要:单一启发式规则在复材热压成型工段动态调度中受到调度环境变化的影响,无法始终取得较高的热压罐利用率。为此,提出一种基于极限学习机的热压成型工段动态调度方法,从历史调度相关数据中提取训练样本数据,利用极限学习机学得有用的调度知识模型,拟在每一个调度决策时刻,根据实时的调度环境定出最佳工件排入罐中。以某复材车间热压成型工段为例进行研究。仿真实验表明:该方法较单一启发式规则能表现出更加稳定且良好的调度结果。

关键词:复材热压成型;动态调度;热压罐利用率;极限学习机;调度知识模型

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0034-05

Research on Dynamic Scheduling of Composite Hot Pressing Section Base on Extreme Learning Machine

GUI Yong¹, LENG Sheng¹, WU Jiyuan¹, YANG Xiangui²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Aviation Industry Changhe Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333002, China)

Abstract: To solve the problem that a single heuristic rule can not always achieve a high utilization rate of autoclave in the dynamic scheduling of composite hot pressing section due to the influence of scheduling environment changes, a dynamic scheduling method of hot pressing section based on extreme learning machine was proposed. The training sample data was extracted from the historical scheduling data, and the useful scheduling knowledge model was learned by applying extreme learning machine. According to the real-time scheduling environment at each scheduling decision-making time, the best workpiece was determined to be discharged into the tank. A case study of hot pressing section of an enterprise was conducted with the simulation results indicating that the proposed method can achieve more stable and better scheduling results than a single heuristic rule.

Keywords: hot pressing of composite; dynamic scheduling; utilization rate of autoclave; extreme learning machine navigation; scheduling knowledge model

0 引言

随着复合材料的大规模生产,合理地生产过程中进行动态调度,能够有效提高车间生产效率和降低生产成本。由于热压罐是复材生产中的瓶颈资源,故复材车间的动态调度中常以热压罐的利用率作为调度目标,并按约束理论进行每个工段的动态调度,即以热压成型工段为基准,对其前面的生产环节实行拉动式生产,后面的生产环节实行推动式生产。如高波等以热压罐的利用率为动态调度目标,将复材制造过程分为若干个工段,提出了按约束理论进行工段动态调度^[1]。陈国慧等以复材热压成型工序为研究重点,提出了基于启发式规则的热压成型工段计划排程^[2]。因此,对热压成型工段的动态调度进行研究,具有重大意义。

对于动态调度,启发式调度规则相比搜索优化算法、整数规划等有着排程迅速和灵活易实施的优势,在实际车间动态调度中广泛应用。然而,大量文献研究普遍认为:没有一个规则在所有的性能指标和调度环境下始终比其他规则要好^[3-4]。因此,有大量学者提出了基于数据的生产动态调度方法,期望从车间历史遗留的调度相关数据中挖掘出有用的调度知识,根据所处的实时调度环境状态,定出较优的调度策略。SHIUE Y R^[5]利用支持向量机学得动态调度规则选择分类器,用于车间控制系统进行实时调度决策。吴启迪等^[6]针对半导体生产线动态调度问题,基于调度优化数据样本,利用特征选择和分类算法获得动态调度模型,以实时定出近似最优的调度策略。吴秀丽等^[7]研究了基于数据驱动的流水车间实时调度,从历史近优的调度方案中提取训练样本,通过BP神经网络学习获取生产系统状态与调度规则的映射关系网络,并将其

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205201)

第一作者简介:桂勇(1997—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为智能制造、生产调度、数据挖掘。

应用于在线实时调度。但上述文献所学得调度知识的输出仍为单一调度规则,由于单一调度规则仅是根据工件的某一属性进行两个工件的对比,其在调度环境的适应性上仍存在一定的局限性。因此本文针对复材热压成型工段动态调度,提出一种基于极限学习机(extreme learning machine, ELM)的动态调度方法,学习获取有用的调度知识模型,并根据实时的调度环境信息以及工件的多种属性对比信息,定出较好的工件排入罐中。

1 复材车间热压成型工段动态调度模型

热压成型工段动态调度问题可看作单工序并行多机调度问题和优化排样问题^[8]的融合:有 n 个相互独立的工件,需要在 m 台功能和加工时间均相同但容量不同的热压罐中加工,每个工件都有确定的加工时间 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和确定的长和宽 (l_i, b_i) , 每台热压罐内的排样面都有确定的长度和宽度 $(L_j, B_j) (j=1, 2, \dots, m)$, 每个工件只需选择其中一台热压罐进行加工,并且可成批组合进罐。调度目标是最大化设备平均利用率 U_{\max} 。约束条件有:1) 工件的长度和宽度必须小于所排入罐的排样面的长和宽;2) 排入每个罐内的所有工件面积总和不能超过该罐排样面的面积;3) 任意两个工件所占的区域不得有交叉部分;4) 一旦工件在机器上加工就不能中断直至其被加工完成;5) 只有加工时间、压力、温度等相关参数相同的工件才能组成同批入罐。

根据以上描述,热压成型工段调度的数学模型如下:

$$U_{\max} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{\sum_{i=1}^{n_k} l_i \cdot b_i}{L_k \cdot B_k} \quad (1)$$

$$l_i \leq L_k, b_i \leq B_k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} l_i \cdot b_i \leq L_k \cdot B_k \quad (3)$$

$$D_i \cap D_i' = \emptyset \quad (4)$$

$$t_i = t_i', F_i = F_i', T_i = T_i' \quad (5)$$

$$E_i \leq H_i, H_i + P_i \leq Q_i \quad (6)$$

式中: p 为所排的罐数; k 为热压罐的索引号; n_k 为第 k 罐的工件数量; L_k, B_k 分别为第 k 罐的排样面的长度和宽度; D_i 为第 i 个工件的所占区域; t_i, F_i, T_i 分别为第 i 工件的加工时间、固化压力和温度; E_i, H_i, P_i, Q_i 分别为第 i 工件的计划开工时间、实际开工时间、加工周期和计划完工时间。

根据以上的动态调度问题描述,可将调度过程分为两部分:调度序列优化+热压罐排样优化。如图1所示,调度序列优化是将可合罐的工件排列成优化的顺序;热压罐排样优化是基于已排好的调度序列,根据设定的排样算法将工件依次排入热压罐中。关于排样优化的方法主要有启发式算法和智能优化算法,由于智能优化算法搜索时间较长,效率低,因此实际应用中常采用启发式算法进行排样。近些年来,贾志欣等提出的最低水平线法^[9]受到了理论界的广泛关注,众多学者对其加以改进应用,都取得了较

好的排样效果。然而,选择不同的调度序列优化算法与最低水平线法结合,会获得不同的排样效果。传统的启发式调度规则多是按某种指标(如面积、边长)^[10-11]对矩形零件排序,但单一的调度规则并不能在所有的排样环境中都取得较好的效果。因此,本文提出基于 ELM 的热压成型工段动态调度方法与最低水平线法结合,在每个排样的决策点时刻,根据实时的调度环境信息和工件对比信息,实时地决策出最佳的工件排入罐中。

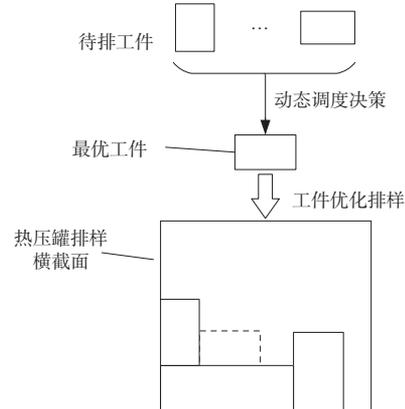


图1 热压成型工段动态调度过程

2 基于 ELM 的热压成型工段动态调度方法

2.1 总体框架

图2为所提出的基于 ELM 的热压成型工段动态调度方法总体框架。整个框架分为两个部分:离线学习阶段和在线调度阶段。

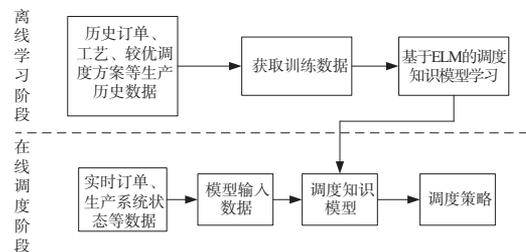


图2 基于 ELM 的热压成型工段动态调度方法总体框架

离线学习阶段:该阶段有获取训练数据和调度知识模型学习两个任务。复材车间在常年的运行生产中积累了大量的历史数据,涵盖了企业订单、工艺、设备、较优调度方案等多方面的调度相关数据。这些数据中隐含了反映实际调度环境特点以及相关调度知识的大量有效信息。因此,需要先从中提取出有价值的训练样本数据,然后通过极限学习机算法进行学习,从而获得调度知识模型。

在线调度阶段:该阶段相当于一个在线实时动态调度器。在每一个调度决策点时刻,根据实时的订单、生产系统状态等数据,提取模型输入数据,输入离线学习阶段学得的调度知识模型中,从而定出较优的调度策略,指导热压成型工段动态调度的进行。

2.2 调度知识特征以及模式的定义

由 2.1 节可知,该调度方法的核心就在于调度知识模型的挖掘,因此本节主要介绍调度知识模型的输入与输出特征以及模式的定义。对于热压成型工段动态调度问题,单一调度规则在对两个工件进行比较时,一般是根据工件之间的一些属性差值,如长、宽、面积等。但在不同的调度环境状态下,仅仅靠单一的工件属性进行比较无法总是获得较好的结果。因此,本文定义调度模式为:根据实时所

处的调度环境状态和工件之间的各种属性差,比较出任意两个工件的优先关系。令调度知识模型的输入特征为调度环境状态特征和工件的各种属性差值特征,表 1 所示为根据文献[9-11]研究归纳出的一些特征属性,其中序号 1-5 为工件之间相关属性的差值特征,序号 6-18 的特征描述了实时调度环境的特征;输出特征为值是 0 或 1 的类属性,其中 0 代表作比较的两个工件的后者优先,1 则代表前者优先。

表 1 输入特征属性

序号	属性名称	定义	表达式
1	${}_jL_D$	工件之间长度之差	$\Delta l_{ii'}$
2	${}_jW_D$	工件之间宽度之差	$\Delta b_{ii'}$
3	${}_jL_W_D$	工件之间长宽比之差	$\Delta (l/b)_{ii'}$
4	${}_jA_D$	工件之间面积之差	$\Delta (l \cdot b)_{ii'}$
5	${}_A W_A_D$	工件排入后右方冗余面积之差	$\Delta [l^e \cdot (b^e - b^f)]_{ii'}$
6	${}_H W$	最低水平线的宽度	l_i^e
7	${}_H L$	最低水平线上方的冗余长度	b_i^e
8	${}_H A$	最低水平线上方的冗余域面积	l_i^e / b_i^e
9	${}_H L_W$	最低水平线上方的冗余长度与宽度之比	$l_i^e \cdot b_i^e$
10	${}_jL_max$	所有冲突工件的长度最大值	$\max_{i \in J_B} \{l_i\}$
11	${}_jL_mean$	所有冲突工件的长度平均值	$\text{mean}_{i \in J_B} \{l_i\}$
12	${}_jL_min$	所有冲突工件的长度最小值	$\min_{i \in J_B} \{l_i\}$
13	${}_jW_max$	所有冲突工件的宽度最大值	$\max_{i \in J_B} \{b_i\}$
14	${}_jW_mean$	所有冲突工件的宽度平均值	$\text{mean}_{i \in J_B} \{b_i\}$
15	${}_jW_min$	所有冲突工件的宽度最小值	$\min_{i \in J_B} \{b_i\}$
16	${}_jA_max$	所有冲突工件的面积最大值	$\max_{i \in J_B} \{l_i \cdot b_i\}$
17	${}_jA_mean$	所有冲突工件的面积平均值	$\text{mean}_{i \in J_B} \{l_i \cdot b_i\}$
18	${}_jA_min$	所有冲突工件的面积最小值	$\min_{i \in J_B} \{l_i \cdot b_i\}$

2.3 基于 ELM 的调度知识模型学习

图 3 所示为本文所需学习的极限学习机神经网络结构,由输入层、隐含层和输出层总共三层神经元构成,其中输入层有 18 个神经元对应 18 个输入特征属性,输出神经元有 1 个,对应一个类属性。

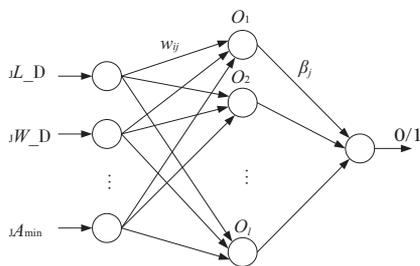


图 3 极限学习机神经网络结构

选取 N 个任意各不相同的样本 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots,$

$N)$,其中 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in R^n, y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}]^T \in R^m$,并设隐含层神经元的激活函数为 $g(x)$,则含有 l 个隐含层节点的 ELM 数学模型可表示为

$$\sum_{j=1}^l \beta_j g(\omega_j x_i + b_j) = t_i \quad (7)$$

式中: ω_j 表示输入层神经元与隐含层的第 j 个神经元之间的连接权值; β_j 为隐含层的第 j 个神经元与输出层神经元之间的连接权值; b_j 为隐含层第 j 个神经元的阈值; t_i 表示 ELM 模型的期望输出。

若该 ELM 模型能以零误差逼近 N 个样本,则存在 β_j, ω_j, b_j ,使得

$$\sum_{j=1}^l \beta_j g(\omega_j x_i + b_j) = t_i = y_i \quad (8)$$

式(8)可表示为

$$H\beta = Y \quad (9)$$

式中: H 为神经网络的隐含层输出矩阵; Y 为 ELM 网络输出矩阵; β 为隐含层到输出层的权值矩阵。因此,一旦输

入层与隐含层之间的神经元连接权值 ω 和隐含层神经元的阈值 b 给定,矩阵 H 就被唯一确定。单隐层神经网络的训练就可以转化为一个线性系统,只需求出输出权重 β 就能完成训练, β 可由式(9)取得:

$$\beta = H^+ Y \quad (10)$$

式中 H^+ 表示隐含层输出矩阵 H 的 Moore-Penrose 广义逆。

3 实例验证

为验证所提出的基于 ELM 的热压成型工段动态调度方法的有效性,本文以某企业复材车间的热压成型工段为例进行研究,基于 Tecnomatix plant simulation 进行仿真实验,并对实验结果进行分析与比较。

3.1 仿真实验设计

本文通过 Tecnomatix plant simulation 仿真软件对某企业复材车间热压成型工段的动态调度问题进行仿真实验。由于实验数据资源有限,本文通过仿真实验,根据该车间的工艺、设备、历史订单数据,确定了一些调度问题实例的参数取值范围(如工件的数量和尺寸、机器的加工时间等),随机构造了 30 个实例问题,然后针对每个问题实例利用 GA 进行仿真,取出每个问题对应的最优调度方案,并在此基础上提取出训练数据对。基于 Python 语言实现 ELM 学习算法,用于调度知识模型的学习。相关算法的实验参数如表 2 所示,所有实验均在 Intel Core i7-4510U、2.6 GHz CPU、8GB RAM、Win8 64 为系统的平台下运行,所涉及的软件有 Tecnomatix plant simulation、python 3、PyCharm。

表 2 算法实验参数

参数类型	参数名称	参数取值
GA 相关参数 (求解调度方案)	初始群体数	50
	代数	50
	交叉概率	0.8
	变异概率	0.1
ELM 相关参数 (学习调度知识模型)	隐含层神经元个数	200
	隐含层激活函数	$\text{sigmoid}(x) = 1/(1+e^{-x})$
	输入层与隐含层间的连接权值	$\text{random}(-1, 1)$
	隐含层神经元阈值	$\text{random}(-0.6, 0.6)$

3.2 结果比较与分析

为了验证所挖掘出 ELM 模型的调度性能,在调度问题参数的取值范围内随机构造了 10 个调度问题实例,分别利用 ELM 模型和各种常见的单一调度规则(面积、宽度、高度、高宽比等进行排序)对问题实例进行求解,并对调度结果进行分析与比较。

表 3 为各种算法的调度性能(设备平均利用率)的数值比较。从表 3 中可以看出,在 8/18 的调度问题求解情况下,ELM 模型的调度性能明显优于其他单一调度规则。

此外,关于 ELM 对训练样本进行学习的过程较为耗时,但学习得出的 ELM 模型用来对测试样本进行决策时,几乎是瞬间完成。据实验统计,ELM 模型预测一条样本的结果大约耗时 0.02 s。因此,完全满足动态调度的实时性要求。

表 3 各种算法的调度性能(设备平均利用率)比较

项目	ELM 模型	基于面积	基于高度	基于宽度	基于高宽比
1	0.863	0.752	0.846	0.703	0.803
2	0.869	0.707	0.779	0.740	0.669
3	0.872	0.691	0.777	0.672	0.675
4	0.853	0.686	0.749	0.629	0.710
5	0.823	0.722	0.765	0.722	0.740
6	0.801	0.813	0.754	0.720	0.674
7	0.828	0.836	0.688	0.835	0.821
8	0.843	0.699	0.674	0.648	0.816
9	0.855	0.709	0.648	0.648	0.674
10	0.839	0.764	0.683	0.654	0.723
平均值	0.845	0.738	0.736	0.697	0.731

另一方面从算法稳定性角度考察 ELM 模型,图 4 所示为 ELM 模型与各单一调度规则在不同的调度问题实例下的调度性能表现。可以看出各种单一调度规则在不同调度问题下的表现差异较大,无法取得稳定的调度结果,而 ELM 模型在不同调度问题下表现良好且稳定。

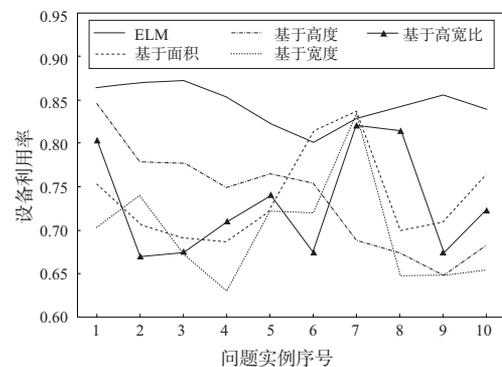


图 4 各算法在不同调度问题下的表现

4 结语

本文针对复材热压成型工段动态调度问题,研究了一种基于 ELM 的动态调度方法,从车间历史存留的调度相关数据中提取训练样本,利用 ELM 从中学得调度知识模型,在每一个调度决策点时刻,根据实时的调度环境状态信息和工件间属性差信息,定出较优的工件排入罐中。该方法不仅适用于实时的车间动态调度过程,而且在调度性能上明显优于其他单一的调度规则。

参考文献:

- [1] 高波,叶文华. 基于约束理论的航空复合材料车间动态调度研究[J]. 中国制造业信息化,2011,40(5):17-22.
- [2] 陈国慧,叶文华. 基于启发式规则的航空复合材料车间生产排程研究[J]. 中国制造业信息化,2012,41(7):9-11,15.
- [3] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等. 动态车间作业调度问题中调度规则算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2016,33(3):648-653.
- [4] PANWALKAR S S, ISKANDER W. A survey of scheduling rules[J]. Operations Research,1977,25(1):45-61.
- [5] SHIUE Y R. Data - mining - based dynamic dispatching rule selection mechanism for shop floor control systems using a support vector machine approach[J]. International Journal of Production Research,2009,47(13):3669-3690.

- [6] 吴启迪,马玉敏,李莉,等. 数据驱动下的半导体生产线动态调度方法[J]. 控制理论与应用,2015,32(9):1233-1239.
- [7] 吴秀丽,孙琳. 智能制造系统基于数据驱动的车间实时调度[J]. 控制与决策,2020,35(3):523-535.
- [8] 贾志欣. 排样问题的研究现状与趋势[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(7):890-897.
- [9] 贾志欣,殷国富,罗阳,等. 矩形件排样的模拟退火算法求解[J]. 四川大学学报(工程科学版),2001,33(5):35-38.
- [10] 马广,刘嘉敏,黄有群,等. 一种有约束矩形排样问题的求解算法[J]. 沈阳工业大学学报,2006,28(4):449-453.
- [11] 黄鹏. 航空复合材料净化车间模具动态调度方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

收稿日期:2021-02-24

(上接第33页)

表5 不同条件下工件表面最高温度对比

V/(r/min)	实验参数		仿真值/℃	实验值/℃	相对误差/%
	a_p /mm	f /(mm/r)			
180	0.3	0.15	50.2	42.8	-14.7
360	0.3	0.15	66.2	57.0	-13.8
180	0.6	0.15	55.5	46.5	-16.2

由表5可知,仿真所得的工件表面最高温度值比实验结果都要高。当 V 为360mm/min, a_p 为0.3mm, f 为0.15mm/r时,所测工件加工表面最高温度可达到57℃,该温度与仿真所得温度66.2℃接近。由于实际切削过程中,工件快速旋转等因素引起的风冷作用,改善了工件表面的散热条件。因此,实验所测得工件表面最高温度普遍偏低。实验与仿真结果的相对误差均<17%,仿真模型具有一定的可靠性。

4 结语

1)建立了铝合金A357切削仿真模型,得到了不同切削参数下工件表面温度分布情况。根据仿真结果可知,增大切削速度和切深,工件加工表面的最高温度均升高,同时工件受切削热影响的区域增大,进而对工件尺寸超差产生较大的影响。

2)设计制作了一种用于铝合金A357表面温度测量的测温样件。通过车削实验验证了所建立工件温度场的

可靠性。该研究对实际生产中切削参数的合理选取、加工工件尺寸测量的时间评估和冷却条件的改善具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 毕运波,方强,董辉跃,等. 航空铝合金高速铣削温度场的三维有限元模拟及试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(7):160-165.
- [2] 张金峰,巩亚东,刘月明,等. 微铣刀磨损对工件温度场影响的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(11):1635-1638.
- [3] 李泽阳,祝宗煌,左立生,等. 6061铝合金盒体的搅拌摩擦封装温度场研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):10-13.
- [4] 杨洋,李金良,周亮. 车削加工AISI 1045工件的切削热建模与仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(5):34-36.
- [5] CHEN L, TAI B L, CHAUDHARI R G, et al. Machined surface temperature in hard turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2017,121:10-21.
- [6] 王洪祥,徐涛,杨嘉. 航空钛合金铣削过程有限元数值模拟[J]. 机械传动,2012,36(2):33-36,49.
- [7] 刘文韬,刘战强. 钛合金Ti-6Al-4V高压冷却车削过程有限元分析[J]. 现代制造工程,2018(10):44-50.
- [8] 舒平生. 基于Abaqus的A357铝合金正交切削加工有限元仿真及其实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(8):43-46,50.

收稿日期:2021-03-04