

引文格式: 肖彪, 张威, 许鹏, 等. 基于多约束规划算法的航空复合材料车间调度优化[J]. 航空制造技术, 2025, 68(10): 74-81.

XIAO Biao, ZHANG Wei, XU Peng, et al. Scheduling optimization of aircraft composites job-shop based on multi-constrain programming algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(10): 74-81.

## 基于多约束规划算法的航空复合材料车间调度优化

肖彪<sup>1</sup>, 张威<sup>1</sup>, 许鹏<sup>2</sup>, 赵正彩<sup>1</sup>, 陈燕<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 复合材料车间的调度优化是提高航空复合材料生产效率的关键技术之一, 具有多品种、混批量的特点。针对航空复合材料生产中热压罐利用率低、完工时间长的问题, 提出了一种多约束规划方法。首先, 基于复合材料生产混批量的特点, 建立了以最大完工时间最小化为目标的数学模型; 其次, 引入间隔变量作为决策变量与逻辑约束条件, 建立多约束规划求解模型; 最后, 采用某航空企业的 8 组实例进行对比试验。结果表明, 本文所提方法相较于原车间排产算法, 能够大幅提高热压罐的利用率。其中热压罐的组合包使用次数和加工总时长分别降低了 35.7% 和 37.4%, 车间生产的完工时间减少了 29.9%, 有效解决了复合材料生产中的车间调度问题。

关键词: 复合材料; 车间调度; 约束规划; 生产计划; 热压罐调度

中图分类号: V26

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.10.074

### Scheduling Optimization of Aircraft Composites Job-Shop Based on Multi-Constrain Programming Algorithm

XIAO Biao<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, XU Peng<sup>2</sup>, ZHAO Zhengcai<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Optimizing the scheduling of composite materials job-shops is a crucial technology for enhancing the production efficiency of aerospace composite materials, which are characterized by multiple varieties and mixed batches. A multi-constraint planning method is proposed to address the problems of low autoclave utilization rate and long completion time in aerospace composite materials production. Initially, a mathematical model is developed to minimize the maximum completion time based on the mixed-batch characteristics of composite material production. Secondly, interval variables were introduced as decision variables along with logical constraints to establish a multi-constraint programming model for solving the problem. Finally, comparative experiments were carried out using eight sets of examples from a certain aviation enterprise. The results indicate that the proposed method significantly enhances the utilization rate of the autoclave compared with the original job-shop scheduling algorithm. Specifically, the number of autoclave batch configuration uses and the total processing time of the autoclave were reduced by 35.7% and 37.4%, and the job-shop production completion time was shortened by 29.9%, it effectively addresses the job-shop scheduling challenges in composite material production.

**Keywords:** Composites; Job-shop scheduling; Constrain programming; Production scheduling; Autoclave scheduling

在航空制造领域,复合材料凭借诸多优势,在飞机零部件的生产中得到广泛应用。相较于传统的金属类材料,复合材料具有强度高、抗腐蚀性强、质量轻、耐高温/低温性好等优点。在复合材料生产车间中,复合材料的生产工艺极为复杂,涉及材料选择、结构设计、成型工艺等多个环节,包括了预浸料制备、预浸料铺叠、热压成型、性能检测、切割、打磨等多个加工阶段<sup>[1]</sup>。热压成型工艺一直是航空复合材料生产的瓶颈,加工时,所采用的热压罐设备价格昂贵,加工工期长,因此需要提高热压罐的利用率<sup>[2]</sup>,实现工程生产中热压成型效率的提升。

航空复合材料车间的生产中,热压罐具有批量加工工件的能力,工件的分批方案直接关系到开罐成本与完工时间。在早期的研究中,将复合材料车间的调度归纳为热压罐的批量调度问题,以最大限度提高热压罐的优先级及利用率为目标。Hindle等<sup>[3]</sup>通过仿真来处理热压罐调度问题,利用热压罐进行特定工件成型时,通过仿真模型筛选出适合的部件进入热压罐,使加工工件等待时间最短。Azami等<sup>[4]</sup>提出了优化加工流程的两阶段混合整数约束模型,重点研究了热压罐调度问题,解决了加拿大某家航空航天公司的实际案例。Dios等<sup>[5]</sup>提出了一种混合整数线性编程模型,用于优化进入热压罐中零件的放置,目标是最大限度地减少固化加工时间。

近些年,相关研究在热压成型调度的基础上,考虑了热压罐以外的资源,将优化目标集中在最小化复合材料生产的最大完工时间。Ye等<sup>[6]</sup>开发了一种启发式方法,利用优先级规则确定部件在热压罐中固化的时间,该方法考虑了重入式车间调度,调度的目标是使所有热压罐的平均利用率最大化,尽可能缩短完工时间。Xie等<sup>[7]</sup>在复合材料的车间调度研究中引入了一种基于启发式规则和局部精确优化的两阶段模型,将热压罐分配视为二维矩形包装问题,优化目标为最小化所有批次的生产间隔。综合上述研究,复合材料车间调度优化的核心是通过改变热压罐中的工件个数来提升热压罐的利用率,最终提高复合材料的生产效率。表1列举了部分研究的研究方法及对象,其中,MILP(Mixed integer linear programming)指混合整数线性规划。

部分研究考虑了复合材料车间的热压罐以外的调度资源,但将热压成型前序及后序资源全部考虑在内的研究需要进一步探讨。本文在研究热压罐分配的同时,考虑了复合材料在生产中从下料到装配完成的所有工序,包括热压前的准备工艺以及热压完成后的后续工艺,使复合材料车间的调度优化更加符合实际生产需求。同时提出了一种适用于复合材料车间的多约束规

划算法,将已经建立的数学模型转换为多约束规划模型并进行求解。本文以某航空企业复合材料车间的生产数据为实例展开研究,旨在将研究成果应用于复合材料车间,最终解决热压罐利用率低、完工时间长的调度问题。

## 1 复合材料生产车间调度

### 1.1 调度问题分析

航空复合材料的生产是一个复杂的过程,包括预浸料、下料裁剪、铺叠、热压成型、无损检测、成型切割、装配、质量检测等加工工艺<sup>[8]</sup>,如图1所示。在热压成型前,工件以多条产线并行的方式进行前期加工,工件整备完成后进行热压成型,如图2所示。将待热压工件放入热压罐高温高压的环境中进行加工,热压罐在固化参数相同的条件下进行多种产品混批量的热压成型<sup>[9]</sup>。热压成型完成后的工件在后续工序中以流水车间加工方式进行加工。图1所示的热压成型工艺具有十分复杂的工序,为了便于对复合材料车间整体的调度展开研究,将对车间情况进行一定的简化处理。在复合材料的热

表1 复合材料车间调度研究

Table 1 Scheduling research for composite job-shop

热压成型调度	复合材料车间调度	研究方法	文献
√	—	仿真	[3]
√	—	启发式及 MILP	[4]
√	—	MILP	[5]
√	√	启发式算法	[6]
√	√	启发式算法及 MILP	[7]

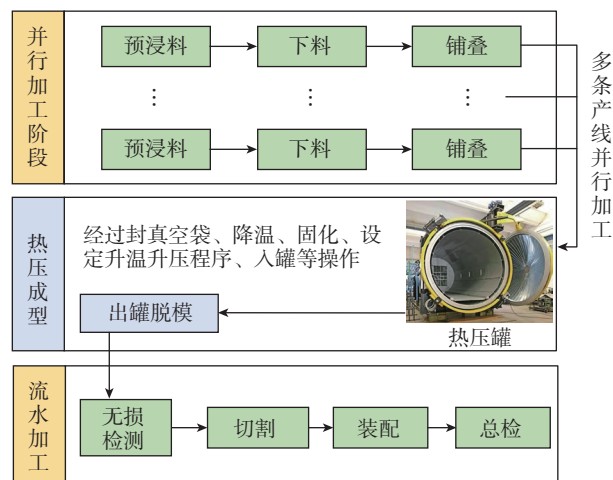


图1 复合材料生产工艺流程

Fig.1 Process flow diagram for composite material production

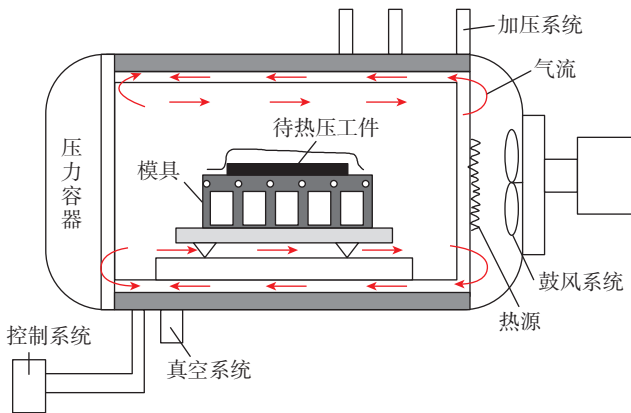


图2 热压成型加工示意图

Fig.2 Schematic diagram of the autoclave molding machining process

压成型工序中,包括真空封装、降温、固化、设定升温加压程序、入罐、真空检漏、出罐脱模等步骤。上述步骤为热压工序的中间操作,同时考虑工件在热压罐进出的周转时间。热压罐加工具有多品种、混批量的特点,同一批次进行热压成型工序的工件要求具有相同的温度、压力等热压参数,加工前进行热分布试验以保证热压成型后每个工件的加工效果。依据航空企业复合材料生产车间的热压成型经验以及多次热分布试验后形成的热压组合包来实现热压罐的多种产品混合批量生产,可选择的热压组合包之间由于组合包内的工件不同,致使热压时长不同。

复合材料生产中,车间调度问题描述如下:存在  $N$  个需要加工的工件  $P=\{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ ,以及  $M$  个热压罐,热压罐集  $O=\{O_1, O_2, \dots, O_M\}$ ,每个工件都需要进行热压成型,热压罐根据热压组合包一次可以同时加工多个工件。本文要解决的调度问题是每个工件的热压成型工艺分配到合适的热压罐进行加工,同时确定工件的其余工序的加工时间与顺序,使得加工完成所有的工件的总时间最小。此问题需要满足的假设如下。

假设 1: 在初始时刻所有工件都可以加工,且所有的热压罐都可以进行热压成型;

假设 2: 每个工件同一时刻只能在一个热压罐上进行加工;

假设 3: 在进行任何一道工序加工时,该工序无法被中断;

假设 4: 一个热压罐在同一时刻只能处理一个热压组合包下的工件,且不能超过组合包中工件的数量;

假设 5: 忽略工件的准备时间或准备时间已经包括在加工时间内,不考虑动态事件,所有工艺的加工时间都已确定;

假设 6: 每台热压罐之间相互独立;

假设 7: 不同的工件之间不存在优先级;

假设 8: 同一工件之间存在顺序约束。

### 1.2 复合材料车间调度问题分析

在航空复合材料的生产中,热压成型是核心工序,主要依赖于热压罐进行加工。由于热压罐造价高昂,且设备数量和产能相对固定,难以通过增加设备来提升生产效率<sup>[10]</sup>。约束理论经过 40 多年不断的发展<sup>[11]</sup>,目前在车间调度问题中的应用也十分广泛,可以提高车间调度问题的求解效果<sup>[12]</sup>,如图 3 所示。利用约束理论,将热压罐视为制约整个生产系统的瓶颈设备,而热压成型工序是瓶颈工序。对于热压成型工序之前的各工序,采用拉动式生产方式,根据瓶颈工序的需求,准时提供所需的半成品和原材料,确保瓶颈工序能够高效运转;对于热压成型工序之后的各工序,则采用推动式生产方式,根据瓶颈工序的产出,推动后续工序的生产,最终实现整个生产系统的输出。通过这种以瓶颈工序为中心,前拉后推的生产计划排产方式,可以最大限度地发挥瓶颈资源的效能,提高整个生产系统的效率和产出能力,生产流程如图 4 所示。

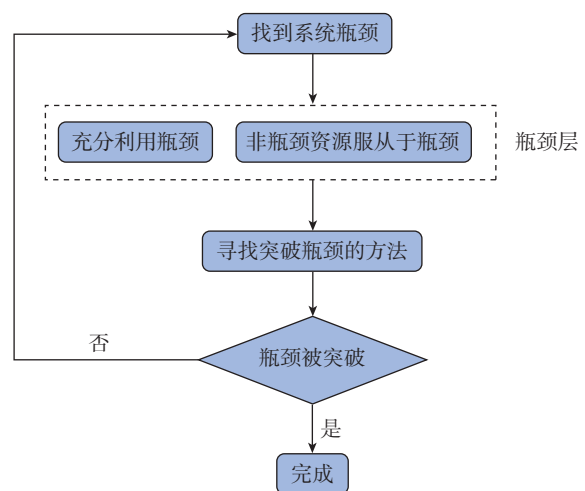


图3 约束理论示意图

Fig.3 Illustration of theory of constraints

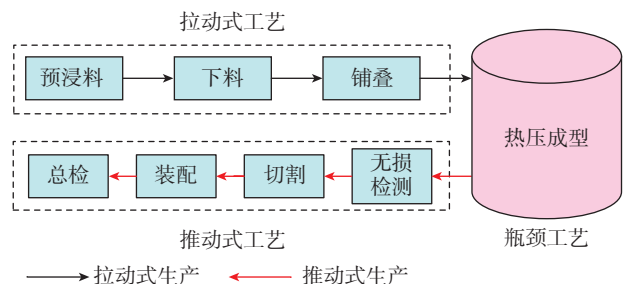


图4 复合材料车间调度前拉后推流程图

Fig.4 Flow chart of pull-forward and push-back scheduling in the composites job-shop

## 2 复合材料车间调度数学模型

与传统复合材料车间调度模型不同的是,本文构建的基于前拉后推的车间调度模型在对热压罐进行合理分配的同时,充分考虑了复合材料车间热压成型工序之外的前序及后序工艺,更符合实际工程生产需要。关于复合材料车间调度的相关符号定义见表2,数学模型如下。

定义加工工件集  $P, P=\{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 。  $P_i$  为第  $i$  个工件,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $P_{ij}$  为工件  $P_i$  的第  $j$  道工序。

定义热压罐集  $O, O=\{O_1, O_2, \dots, O_M\}$ 。  $O_k$  为第  $k$  个热压罐,  $k=1, 2, \dots, M$ 。

定义工件的热压成型工序集  $Q, Q=\{Q_1, Q_2, \dots, Q_L\}$ 。  $Q_l$  为第  $l$  个热压成型工序,  $l=1, 2, \dots, L$ 。

定义热压罐热压组合包集  $S, S=\{S_1, S_2, \dots, S_H\}$ 。  $S_h$  为第  $h$  个热压组合包,  $h=1, 2, \dots, H$ 。

定义热压罐组合包中的加工工件数为  $S_{hi}$ , 定义工件  $P_i$  的热压工序  $Q_l$  的开始加工时间为  $ST_{PQ_l}$ , 加工工时为  $T_{PQ_l}$ ,  $Q_l$  到  $Q_{l+1}$  之间的非热压成型工序的加工工时为  $NT_{PQ_l}$ ;

定义热压罐选择参数为  $u_{PQ_l t}$ , 若  $t$  时刻工件  $P_i$  在设备  $O_k$  上进行热压成型加工,  $u_{PQ_l t}$  为 1, 否则为 0。

复合材料生产调度的目标是加工的最大完工时间最小。确定车间中每个工件  $P_i$  的工序  $Q_l$  的开始时间  $ST_{PQ_l}$  和完工时间 ( $ST_{PQ_l} + T_{PQ_l}$ ), 并且确定该工序  $P_{ij}$  的加工热压罐  $O_k$ , 即

$$\min \{ \max \{ C_i \} \}, C_i = ST_{PQ_l} + T_{PQ_l} \quad (1)$$

依据对航空复合材料制造车间的分析与定义,生成

表2 符号定义

Table 2 Definition of symbols

参数	含义
$N$	加工工件总数
$M$	热压罐总数
$L$	热压成型工序总数
$H$	热压组合包总数
$i$	工件索引
$j$	工序索引
$k$	热压罐索引
$Q$	热压成型工序集
$ST_{PQ_l}$	热压工序 $Q_l$ 的开始加工时间
$T_{PQ_l}$	热压工序 $Q_l$ 的加工时间
$C_i$	第 $i$ 个工件完工时间

计划所需满足的约束条件如下。

加工工件的时间约束:

$$ST_{PQ_l} + T_{PQ_l} + NT_{PQ_l} \geq ST_{PQ_{l+1}} \quad (2)$$

$$ST_{PQ_{l+1}} \leq ST_{PQ_l} + T_{PQ_l} + NT_{PQ_l} + 24 \quad (3)$$

热压罐热压组合包中包含的加工工件数量约束:

$$\sum_P u_{PQ_l t} \leq S_{hi} \quad (4)$$

一道工序同一时刻只能在同一台设备上加工:

$$\sum_M u_{ijQ_l t} | t=1 \text{ 或 } 0 \quad (5)$$

式(2)确保了每一轮热压成型的启动时间要迟于上一轮热压完成时间与中间工序所需时间的总和;式(3)保证了铺设结束后的 24 h 之内开始新一轮热压;式(4)表明,在任何给定时间,热压罐中正在热压成型的工件数量不得超过热压组合包的最大容量;式(5)中,  $u_{ijkt}$  表示热压罐选择的决策变量,表示一道工序在某一时刻只能在同一热压罐中进行加工。

## 3 多约束规划求解复合材料车间调度

### 3.1 多约束规划算法介绍

随着计算机技术的发展和人工智能概念的提出,针对组合优化问题构建了新的建模方法,其中以约束规划算法为典型代表。作为数学编程公式,约束规划已经被证明是一种高效方法。约束规划中逻辑约束的使用可以简洁地表示各类组合优化问题,从而在明确问题特征与缩小解空间方面得到提升<sup>[3]</sup>。车间的生产调度问题可定义为:确定工件的各个工序应在何时、何地进行加工与执行,明确工件工艺的始加工时间和完成加工时间,该问题属于约束满足问题。针对车间调度问题,约束规划算法可以考虑更加接近实际生产的约束条件,从而制定有效的解决策略。目前,该算法已在多种车间调度优化场景中得到广泛应用,如非置换流水车间<sup>[4]</sup>、零等待流水车间、柔性车间<sup>[5]</sup>、混合流水车间、批量车间等<sup>[6]</sup>。

将多约束规划算法应用于车间调度问题中,首先需要车间调度问题进行多约束规划建模。在此基础上,将问题的目标函数转换为适用于约束满足问题的形式,并通过迭代来寻求解决方案,直至解决方案在已经设定的误差阈值范围内。与传统的数学规划不同,多约束规划依赖于数学、逻辑和集合约束等更为复杂和直观的约束系统<sup>[7]</sup>。解决方案的迭代过程不仅仅是简单的求解,还包括对约束的传播和领域的缩减,以及一致性的检查,这有助于压缩解空间并有效剔除无效的搜索路径<sup>[8]</sup>。

### 3.2 约束规划求解

在多约束规划算法中,复合材料车间调度问题被定义为一组决策变量和约束条件,通过定义决策变量之间

的关系与约束条件,约束规划求解系统将自动找到满足约束条件的解。多约束规划的求解器基于冲突驱动学习技术的算法来搜索满足所有约束条件的解。本文建立的多约束规划模型是基于 Google 开源组合优化软件 OR-Tools 来实现,OR-Tools 可以在 Python、C++、Java 等多编程语言下使用,本文将利用 Python 3.11 语言来实现约束规划模型的构建,并利用 OR-Tools 求解器进行求解。下文为本研究所构建约束规划模型的核心部分。

### 3.2.1 决策变量

(1)非瓶颈工艺间隔变量。

首先为非瓶颈工艺创建变量。非瓶颈工艺包括并行加工阶段与流水加工阶段。在 OR-Tools 中的多约束规划模型创建过程中,通过遍历所有工件加工信息(除热压工艺外的其余部分)创建间隔变量。

```
Interval_var = model.NewIntervalVar(Start_var,
    Task_duration, End_var) (6)
```

式中,通过 NewIntervalVar 来创建间隔变量,变量(Start\_var, Task\_duration, End\_var)表示工件的加工工艺时间段(加工开始时间、加工持续时长、加工结束时间)。

(2)瓶颈工艺变量(热压成型工艺变量)。

前文提到了热压罐存在不同的热压组合包,在多约束规划模型的创建中,遍历每一个热压罐热压组合包,并通过创建间隔变量的方法来实现瓶颈工艺变量的构建。

```
Heat_interval_var = model.NewIntervalVar
(Heat_Start_var, Task_duration, Heat_End_var)
Heat_press_tasks[config_id].append(Heat_interval_var) (7)
```

式中,NewIntervalVar(Heat\_Start\_var, Task\_duration, Heat\_End\_var)为热压罐中每一个组合包创建间隔变量(热压成型开始时间、持续时长、热压成型结束时间),最后存储至列表 Heat\_press\_tasks 中。

### 3.2.2 添加优化目标函数

本文的优化目标为最小化最大完工时间。通过确定最后一个工件最后一道工序的完成时间,从而得到最大完工时间,并对此进行优化。

```
model.Minimize(makespan) (8)
```

式中, makespan 为模型的最大完工时间,通过 Minimize 函数使得优化目标最小化。

### 3.2.3 约束条件

引入约束条件是多约束规划方法的关键,针对复合材料生产车间的多约束规划方法主要包括非瓶颈阶段约束、累积约束两部分约束条件。针对复合材料加工多品种、混批量的特点,重点考虑了热压工件的数量约束,通过累积约束来实现热压组合包中具有相同热压温度、压力等热压参数的多个工件的热压成型。

(1)非瓶颈阶段并行加工与流水加工约束。

在多约束规划模型中,需要实现并行加工阶段的并行约束,通过增添不重叠约束来实现。在流水加工阶段需要实现流水车间式加工,即实现各个工件直接的顺序约束。并行加工约束表示为

```
model.AddNoOverlap(Task_intervals) (9)
```

式中, model.AddNoOverlap 为 OR-Tools 中的非重叠约束,确保当前所有间隔变量在同一时间不重叠; Task\_intervals 为并行阶段加工变量。

流水加工约束表示为

```
model.Add(Task_vars[Task_id][0] >= Task_vars
[Task_id-1][1]) (10)
```

式(10)为模型创建了流水加工阶段的顺序约束,确保后一道工序的开始加工时间(Task\_id[0])大于等于前一道工序的结束时间([Task\_id-1][1]),确保前一工序加工完成后才可以加工下一工序。

(2)创建累积约束。

本研究中,为了实现热压罐的工件累积约束,在多约束规划模型的构建中,通过 AddCumulative 函数来实现约束。为选中的配置创建工件数量累积约束,保证各个工件的数量不超过热压罐热压组合包对其的数量约束。

```
model.AddCumulative(Intervals, Demands, Max_capacity) (11)
```

式中, Intervals 为热压罐组合包间隔; Demands 为每个间隔的需求值; Max\_capacity 为当前热压组合包可加工的最大工件数。

(3)热压工艺开始约束。

在复合材料的生产中,需要保证热压成型在并行加工阶段完成后进行,同时后续流水加工阶段要在热压成型结束后进行。

```
model.Add(Heat_press_start >= Last_parallel_task_end) (12)
```

式中, Heat\_press\_start 为热压加工的开始时间; Last\_parallel\_task\_end 为并行加工阶段的结束时间,实现热压成型在并行加工阶段后进行。

```
model.Add(First_serial_task_start_var >= Heat_press_end) (13)
```

式中, First\_serial\_task\_start\_var 表示流水加工阶段开始时间; Heat\_press\_end 表示热压的结束时间,保证了流水加工阶段在热压成型后进行。

综合上述约束,将构建的复合材料车间调度数学模型转换为 OR-Tools 中的多约束规划模型。建模过程考虑了更多的实际生产中的调度状态,更加符合实际生产需要。

### 4 实例验证

本文通过 Google 的开源组合优化软件 OR-Tools 来进行求解,求解器为 Python 下约束规划引擎。测试环境为 Windows 10 系统,8 GB 内存, Intel Core i5-12400f 4.00 GHz CPU。以某航空企业的复合材料制造厂的实际生产线为对象进行该调度研究的验证。其中包括 3 种待加工工件  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ,该实例下 3 种工件的数目均为 5 个,共计 15 个工件。3 种工件在各个工艺的加工时长如表 3 所示。多种热压组合包配置信息如表 4 所示,对应各热压组合包下工件数目与热压成型时长。

#### 4.1 求解参数讨论

在约束规划求解器中,求解时间的设定是影响优化结果的关键参数,通过表 3 实例进行参数验证试验,共设置了 6 组不同的求解时间,每种求解时间试验运行 10 次求平均值,对应的计算结果如图 5 所示。可以看出,随着求解时间的增加,最大完工时间逐渐降低。其中在求解时间由 60 s 提升至 120 s 时变化最为明显,最大完工时间由 69 h 缩小至了 66 h。当求解时间为 240 s 时,最大完工时间为 64 h;当求解时间增加到 300 s 时最大完工时间求得最优解 64 h。在求解时间达到 240 s 后最大完工时间趋于稳定,综合考虑后求解时间设置为 240 s。

表 3 非瓶颈阶段工艺加工时间

Table 3 Processing time of non-bottleneck stage processes

工件	预浸料	下料	铺叠	脱模	无损检测	切割	装配	总检
$P_1$	8	2	11	2	2	3	1	1
$P_2$	9	3	14	2	3	2	2	1
$P_3$	7	2	8	1	1	2	1	1

表 4 热压组合包配置信息

Table 4 Hot pressing composite package configuration information

热压组合包	包含工件	工件数/个	热压时长/h
$S_1$	$P_1$	3	14
	$P_2$	2	14
	$P_3$	2	4
$S_2$	$P_1$	2	10
	$P_2$	2	10
	$P_3$	1	10
$S_3$	$P_1$	2	11
	$P_2$	—	11
	$P_3$	—	11
$S_4$	$P_1$	—	6
	$P_2$	—	6
	$P_3$	2	6

工时间由 69 h 缩小至了 66 h。当求解时间为 240 s 时,最大完工时间为 64 h;当求解时间增加到 300 s 时最大完工时间求得最优解 64 h。在求解时间达到 240 s 后最大完工时间趋于稳定,综合考虑后求解时间设置为 240 s。

#### 4.2 实例优化结果比较

进行复合材料车间调度优化研究的目的是通过多约束规划算法提高热压罐的利用率和整体生产效率。设计对比试验验证多约束规划算法在提升热压罐利用率的有效性,图 6 为某航空企业在复合材料车间不同工

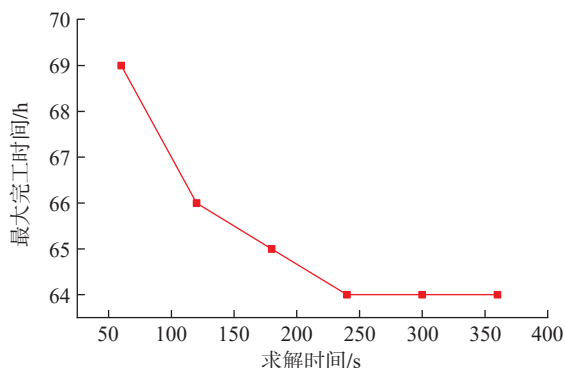
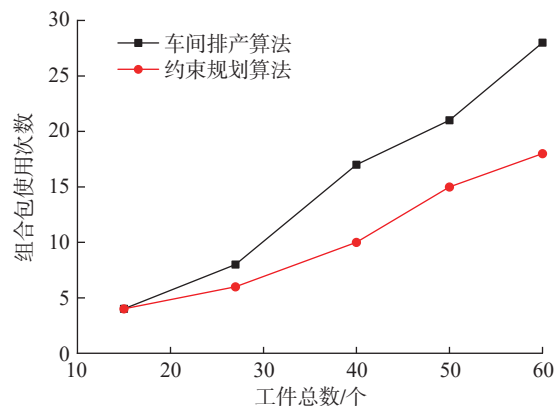
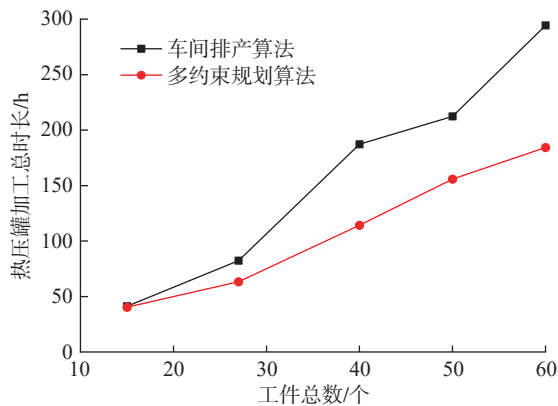


图 5 不同求解时间对目标值的影响趋势

Fig.5 Trend of the effect of different solving time on the target value



(a) 组合包使用次数对比图



(b) 热压罐加工总时长对比图

图 6 热压罐利用率对比图

Fig.6 Comparison chart of autoclave utilization rate

件实例下的运行结果。通过对比两种算法结果可以看出,热压组合包的使用次数降低了 35.7%,热压罐的加工总时长降低了 37.4%。

使用两种算法独立运行 10 次得到的计算结果如表 5 所示。采用相对百分比偏差 (RPD) 表示同一算例不同算法求解的偏差程度,  $RPD=100\% \times (\text{Best}-\text{Min})/\text{Min}$ , 其中 Best 表示各算法对于某一算例独立运行 10 次获得的最优值; Min 表示不同算法对于同一算例求得

的 Best 中的最小值。RPD 越大说明计算结果相较于最优值的偏差越大, RPD 最小值为 0 表示计算结果为算法中的最优值。

从表 5 可以看出,多个实例下的最优解均为本文所采用的多约束规划算法所计算得出,每个算例下的优化结果均得到了较大提升。实例 8 中的最大完工时间相较于车间排产算法减少了 29.9%。对表 5 中两种算法求得的 RPD 进行分析,多约束规划算法仅在实例 5 计算结果的 RPD 中取得 1%,其余实例的 RPD 均为 0,说明多约束规划算法在求解结果的最优值和稳定性方面具有优越性。图 7 给出了多约束规划算法对实例 5 的最优解甘特图,最大完工时间为 64 h。

表 5 最优解结果对比

Table 5 Comparison of optimal solution results

实例	组合包数	热压罐数	工件数/个	车间排产算法		多约束规划算法	
				Best/h	RPD/%	Best/h	RPD/%
1	2	1	8	41	5.11	36	0
2	3	1	8	36	8.52	36	0
3	2	1	12	62	1.47	45	0
4	4	2	12	54	6.56	42	0
5	4	2	15	86	11.67	64	1
6	8	2	15	77	9.82	58	0
7	8	2	60	254	19.41	178	0
8	16	4	60	201	21.06	178	0

### 5 结论

本文针对复合材料生产车间热压罐利用率低、热压成型完工时间长的调度问题,开展了复合材料生产模式分析,以最小化最大完工时间为优化目标建立调度模型,并提出了一种有效的多约束规划算法进行求解。

(1) 利用约束理论对复合材料车间调度问题进行分析,将热压成型前序装备阶段与后序处理阶段都纳入调度模型的构建,有效解决了传统调度模型仅考虑热压成型单一工序的局限性。

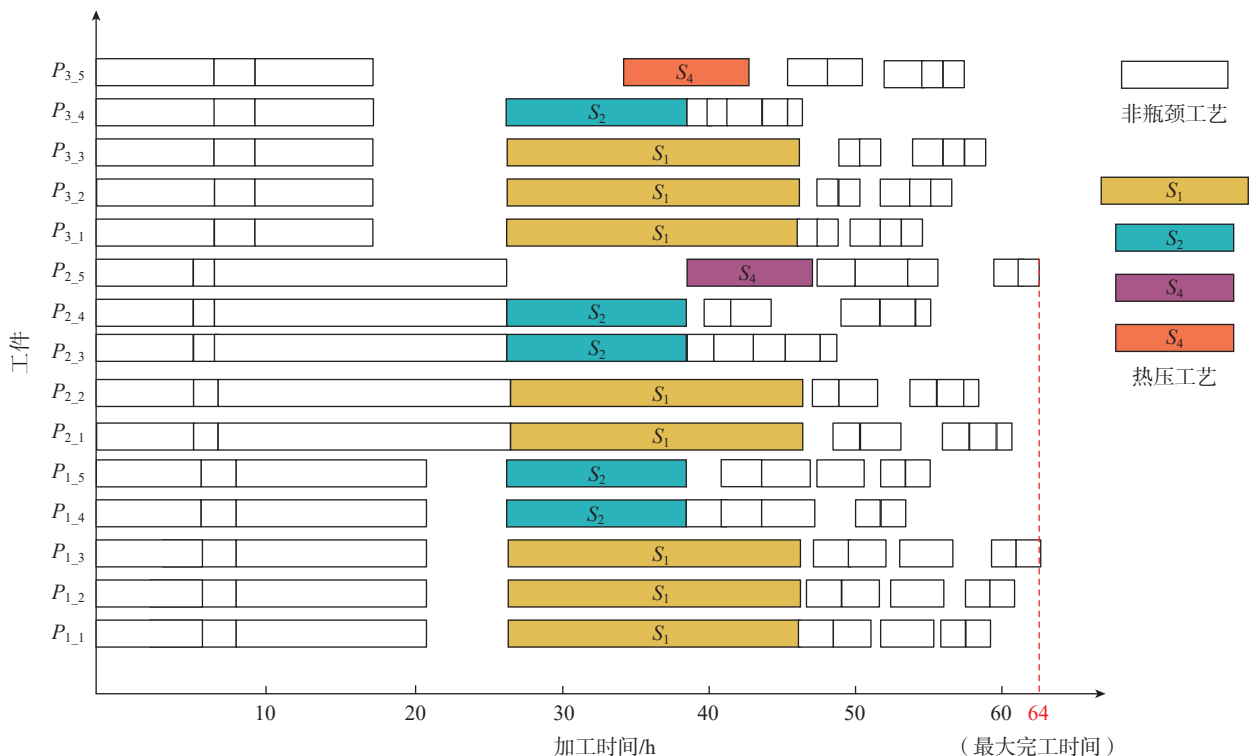


图 7 实例 5 求解甘特图

Fig.7 Gantt chart of the solution for Example 5

(2)提出了多约束规划算法进行求解,该算法通过考虑实际生产中的多种约束,实现了热压罐利用率的提升。多组实例的对比试验表明,多约束规划算法的热压组合包使用次数降低了35.7%,热压罐加工总时长降低了37.4%,验证了多约束规划算法提升热压罐利用率的有效性。

(3)采用某航空企业的8组实例与实际车间排产进行最优值及平均值的对比,结果表明在相同生产订单条件下,多约束规划算法相较于企业现行调度方案,最大完工时间减少了29.9%,展现了多约束规划算法在解决复合材料车间调度问题方面的有效性与稳定性。

本研究通过理论建模与实例验证的双重突破,既为热压罐调度难题提供了全新的解决方案,也为多约束生产系统的优化研究开辟了新路径,充分验证了多约束规划算法在处理复杂工业调度问题中的独特优势。未来研究将着重考虑设备故障等不确定因素,进一步拓展算法在动态扰动环境下的自适应能力。

### 参考文献

- [1] 王恩青,张斌. 复合材料在航空航天中的发展现状和未来展望[J]. 科技信息, 2011(33): 290.
- WANG Enqing, ZHANG Bin. Development status and future prospect of composite materials in aerospace[J]. Science & Technology Information, 2011(33): 290.
- [2] 顾文波. 国外飞机结构复合材料应用现状分析[J]. 国防技术基础, 2015, 14(1): 36-38.
- GU Wenbo. Application and development of composites on aircraft structural abroad[J]. Technology Foundation of National Defence, 2015, 14(1): 36-38.
- [3] HINDLE K, DUFFIN M. Simul8-planner for composites manufacturing[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, 2006: 1779-1784.
- [4] AZAMI A, DEMIRLI K, BHUIYAN N. Scheduling in aerospace composite manufacturing systems: A two-stage hybrid flow shop problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9): 3259-3274.
- [5] DIOS M, GONZALEZ-R P L, DIOS D, et al. A mathematical modeling approach to optimize composite parts placement in autoclave[J]. International Transactions in Operational Research, 2017, 24(1-2): 115-141.
- [6] YE W H, LI J, CHEN W F, et al. Study on scheduling method for reentrant autoclave moulding operation of composite materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 490-491: 14-18.
- [7] XIE N M, ZHENG S X, WU Q. Two-dimensional packing algorithm for autoclave molding scheduling of aeronautical composite materials production[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 146: 106599.
- [8] 郝建伟,陈亚莉. 先进复合材料主要制造工艺和专用设备[J]. 航空制造技术, 2008, 51(10): 40-45.
- HAO Jianwei, CHEN Yali. Manufacturing technology and special equipment for advanced composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(10): 40-45.
- [9] 陈博. 国内外复合材料工艺设备发展述评——热压罐成型[J]. 复合材料科学与工程, 2023(S1): 121-134.
- CHEN Bo. A review of the development of composite process equipment at home and abroad—Autoclave molding[J]. Composites Science and Engineering, 2023(S1): 121-134.
- [10] 陈国慧. 基于约束理论的航空复合材料生产计划排程系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- CHEN Guohui. Production planning and scheduling system of aviation composite materials based on constraint theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [11] 王建朝,袁逸萍,李晓娟,等. 关键链约束理论解决柔性车间调度问题[J]. 机械设计与制造, 2019(2): 30-33.
- WANG Jianzhao, YUAN Yiping, LI Xiaojuan, et al. Critical chain theory of constrain for the flexible job shop scheduling problem[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(2): 30-33.
- [12] 李绍初,熊文华. 基于TOC理论对铸造工序的瓶颈探寻及改善[J]. 铸造工程, 2024, 48(2): 75-80.
- LI Shaochu, XIONG Wenhua. Exploration and improvement of bottlenecks in the casting process based on TOC theory[J]. Foundry Engineering, 2024, 48(2): 75-80.
- [13] ACHTERBERG T, BIXBY R E, GU Z H, et al. Presolve reductions in mixed integer programming[J]. INFORMS Journal on Computing, 2020, 32(2): 473-506.
- [14] ROSSIT D A, TOHMÉ F, FRUTOS M. The non-permutation flow-shop scheduling problem: A literature review[J]. Omega, 2018, 77: 143-153.
- [15] COELHO P, PINTO A, MONIZ S, et al. Thirty years of flexible job-shop scheduling: A bibliometric study[J]. Procedia Computer Science, 2021, 180: 787-796.
- [16] PRATA B A, ABREU L R, NAGANO M S. Applications of constraint programming in production scheduling problems: A descriptive bibliometric analysis[J]. Results in Control and Optimization, 2024, 14: 100350.
- [17] WEISS G. Scheduling: Theory, algorithms, and systems[J]. IIE Transactions, 1996, 28(8): 695-697.
- [18] 万兵,韩维,梁勇,等. 舰载机出动离场调度优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12): 3624-3634.
- WAN Bing, HAN Wei, LIANG Yong, et al. Optimization algorithm of carrier-based aircraft sortie departure scheduling[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(12): 3624-3634.

通信作者: 肖彪, 博士研究生, 研究方向为智能加工单元调度优化、智能工艺设计。

赵正彩, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂结构自适应智能加工。

(责编 七七)