

引文格式: 孙琳, 郑绍祥. 基于多因素约束的复合材料成型制造进罐计划排程方法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(20): 126-133.
SUN Lin, ZHENG Shaoxiang. Study on production plan of autoclave based on multifactor constrain in composite forming manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(20): 126-133.

基于多因素约束的复合材料成型制造进罐计划排程方法研究

孙琳¹, 郑绍祥²

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610000;
2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 航空复合材料零件制造过程中, 热压罐作为关键设备, 需要接受多个铺叠工段的复合材料预制件, 按照设备面积、资源、零件数量、工艺参数、工艺约束以及工装设备等多种约束条件进行组包进罐固化。为了提高热压罐设备的生产计划排程效率, 考虑复材零件多品种、小批量以及多因素约束特点, 提出了基于多因素约束的复合材料成型制造进罐计划排产方法, 并成功应用于某复材零件制造企业。通过实际生产数据验证, 基于多因素约束的进罐计划排产方法不仅能够实现对生产的指导, 还提高了进罐计划排产效率。

关键词: 复合材料; 进罐计划; 多因素约束; 固定组包; 工序切换

Study on Production Plan of Autoclave Based on Multifactor Constrain in Composite Forming Manufacturing

SUN Lin¹, ZHENG Shaoxiang²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610000, China;
2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In the manufacturing process of aviation composite parts, autoclave is the key equipment, which needs to accept composite preforms from other lay-up sections, and then pack into autoclave according the equipment area, resources, number of parts, process parameters, process constraints and tooling equipment and so on. In order to improve the production scheduling efficiency of autoclave, considering the characteristics of multi variety, small batch and multi factor constrains of composite parts, a method for production plan of autoclave based on multifactor constrain in composite forming manufacturing is proposed, which is successfully applied to a composite parts manufacturing enterprise. Through the actual production data verification, the scheduling method based on multifactor constrains can not only realize the guidance of production, but also improve the scheduling efficiency.

Keywords: Composite material; Production plan of autoclave; Multifactor constrains; Fixed package; Process switching

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.20.126

随着科技的发展, 在高科技复杂装备制造中, 复合材料的应用比例越来越大, 在航空领域的应用已成为衡量航空装备先进水平的重要标志之一^[1-3], 对于航空装备结构轻质化、小型化有至关重要的作用。航空复合材料生产工艺复杂, 前后工序关联性强, 且加工过程

具有可重入制造的特点, 生产计划调度复杂, 因此复合材料制造企业不可避免地会遇到生产计划排程问题^[4]。许多国内外学者对复合材料车间生产计划排程进行了研究, 并提出各种不同的算法、建模方法及各种仿真方法^[5-9]。

王海宁等^[10]提出实时排程模式下的车间生产调度系统设计思想,实现基于遗传算法的自动排程和基于Agent的自动导航与派工技术,提高了设计、生产、管理水平和生产效率。万春辉等^[11]对时间动态变化影响动态调度进行了研究,提出了动态工作日制的动态实现策略和关键算法,为实现动态日制的离散提供了一个具体的应用方案。Lou等^[12]提出了一种分布式调度方法,面向一个任务机分配的多代理的解决方案。张国庆等^[13]提出针对复合材料车间计划排产的方法和步骤,建立了基于启发式规则算法的优化排产模型,侧重以班组为相对独立的生产单元进行处理,并未优化到后续工序。陈国慧^[14]、陈国恩^[15]和令狐强^[16]等都研究了基于约束理论生产计划排程方法,分别侧重于航空复合材料的瓶颈设备的研究、工程机械行业工序级车间计划、军品制造业的车间生产计划排程。本文通过结合航空复合材料零件制造企业的实际生产情况,针对热压罐设备的多因素约束情况,对热压罐的计划排程进行了研究。

在航空复合材料零部件制造过程中,热压罐是一个共享的资源,而在热压罐成型之前,是多个品种的复合材料零件并行铺叠,并且热压罐成型工序有资源、面积、零件数量、工艺参数等多种因素约束,在热压罐成型之后,是多个品种的零件各自串行的工序。为了提高热压罐进罐计划排程的效率,同时考虑热压罐的利用率和均衡负荷,本文针对热压罐设备的各种约束因素,提出了热压罐进罐计划的约束条件和目标函数,建立了对热压罐进罐计划排程的数学模型,通过试验数据对算法进行了验证,验证了进罐计划排程方法的可行性。将本文方法应用于实际案例,通过与人工经验排程进行数据统计分析,表明了方法的有效性。

1 复合材料成型制造进罐计划约束

在复合材料零件成型过程中,热压罐成型是普遍使用的成型工艺方法。热压罐成型是将预浸料等易变质材料在工装模具上按预定方向铺叠成复合材料坯料并放在热压罐内,在规定温度和压力下完成固化过程的工艺方法。在这个过程中需要考虑的约束规则如表1所示。

其中,热压罐计划之间间隔时间、工序间周转时间、热压罐每一层面积使用阈值、热压罐每一层零件数量上限以变量参数的形式由用户进行控制,固定包方案作为输入数据进行控制,其他约束因素则通过算法过程进行控制。

2 复合材料成型制造进罐计划排程方法

2.1 进罐计划排程算法模型

基于上述排程约束规则,可建立复合材料成型制造

进罐计划排程的函数模型。模型的目标是在满足约束的前提下使工装放进热压罐内且使热压罐的利用率尽可能大。模型变量定义如下:

- (1) J 为所有订单零件的集合, $J=\{1, 2, \dots, n\}$;
- (2) M 为所有热压罐设备的集合, $M=\{1, 2, \dots, m\}$;
- (3) T 为所有工装的集合, $T=\{1, 2, \dots, p\}$, 每个工装的长度和宽度分别为 l_j 和 w_j , 工装需求的真空嘴和热电偶的数量分别为 v_j 和 h_j ;
- (4) S 为固定包方案集合, $S=\{1, 2, \dots, g\}$;
- (5) P_j 为零件 J_j 的所有工序集合, $P_j=\{1, 2, \dots, n_j\}$, 对应的工序加工时间为 d_{ji} ($i=1, 2, 3, \dots$), c_{ji} 为各固化工序的程序号;
- (6) K_j 为零件的建议工装集合, $K_j=\{k_1, k_2, \dots, k_i\}$, $k_i \in T$;
- (7) 热压罐 M_k 的长度和宽度分别是 L_k 和 W_k , 可用的真空嘴和热电偶总数分别为 V_k 和 H_k , 且订单零件 J_j 关联的热压罐集合为 $A_{ji}=\{a_1, a_2, \dots, a_i\}$, $a_i \in M$;
- (8) 各热压罐可用时间段集合为 $T_m=[[t_1, t_2], [t_3,$

表1 进罐计划约束
Table 1 Constraint of tank feeding plan

约束类别	约束内容
热压罐设备约束	热压罐空闲时可排计划
工装资源约束	工装资源在可用状态时可排相关联零件的计划; 多次进罐固化的零件只有最后一次固化完成并脱模之后, 工装才可被释放
热压罐资源约束	热压罐内真空嘴、热电偶数量需大于等于进罐零件所需的真空嘴和热电偶数量; 热压罐内的空间需大于进罐零件所需空间
工艺约束	经过工艺评审的热压罐可用于排相应机型的零件, 优先选择建议等级高的热压罐; 使用相同固化参数的零件可以同时组包进罐
生产约束	同一个热压罐的每一罐计划之间需要合适的间隔时间; 不同工序之间需要周转时间
前序工序约束	进罐固化工序之前由工人手工操作的工序需考虑正常的工作时间, 而非 24 h 工作制
经验与习惯约束	依照经验和习惯将固定进罐的零件集合组成固定包方案, 作为基础数据, 零件组包时优先选择固定包方案中的零件一起组包
订单约束	所有订单零件默认先按照优先级从高到低排序再按照订单交付先后时间排序, 排序越前越早固化
其他约束	热压罐每一层面积使用阈值; 热压罐每一层零件数量上限

$t_4], \dots], t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4 \leq \dots;$

(9) 各工装的可用时间段集合 $T_i = [[t_1, t_2], [t_3, t_4], \dots], t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4 \leq \dots;$

(10) s_{sum} 为每个热压罐的切换时间,是上一个包的结束准备时间和下一包的开始准备时间之和。

目标函数如下:

$$\max z = \sum_{j \in T} e_j l_j w_j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in T} e_j v_j \leq V_k, \sum_{j \in T} e_j h_j \leq H_k, k \in M \quad (2)$$

$$e_j \in \{0, 1\}, j \in M \quad (3)$$

式(1)为所有放入热压罐平板的工装的面积之和。

式(2)为放入热压罐内的工装需求的真空嘴和热电偶总数不能高于热压罐内真空嘴和热电偶的数量。式(3)表示工装是否可放入热压罐内, $e_j=1$ 为是, $e_j=0$ 为否。

其中,订单、工装、热压罐的关系如图1所示。各变量调用顺序如图2所示。

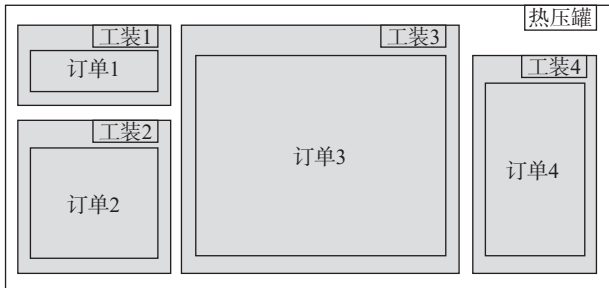


图1 订单、工装与热压罐关系

Fig.1 Relationship diagram of order, tooling and autoclave

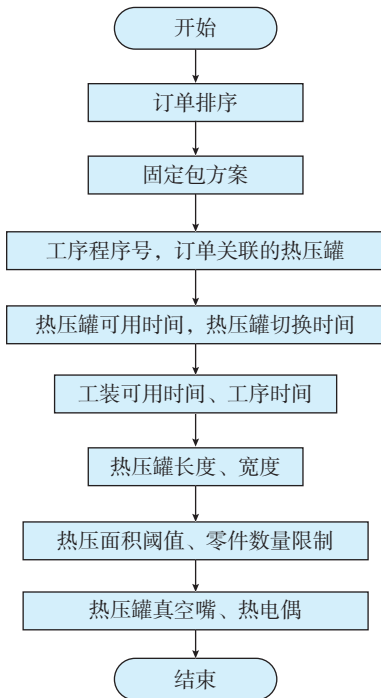


图2 变量调用顺序示意图

Fig.2 Schematic diagram of variable call sequence

2.2 进罐计划排程算法流程

进罐计划算法流程图如图3所示。其具体步骤如下。

(1) 读取固定包基础数据,将订单零件按照优先级排序,设第1个零件为 J_1 , 查找 S 中包含 J_1 的固定包方案。若存在这样的固定包方案,则反向匹配该固定包方案中其他零件 J_r , 并从 J 中删除与 J_r 相同的零件; 若不存在,从 J 中删除 J_1 ,继续匹配。直至 $J=\phi$ 结束匹配,设匹配到的固定包清单为 S^* , 剩余未匹配到的散件零件各自为一个散件包,设散件包清单为 S_u 。

(2) 对所有散件包 S_u 进行优先级排序。

(3) 若存在固定包,则对固定包进行优先级排序,读取第1个固定包 S_1^* , 选择固定包的建议热压罐,遍历散件包 S_u , 将具有相同的固化程序号、相同的建议热压罐以及可用工装的散件加入固定包中,直到插入的散件工装面积超过热压罐平板面积或无散件可插入为止; 若已不存在固定包,则对散件打包,根据包内零件的已成型次数和工序信息以及热压罐建议信息选择建议热压罐,生成建议热压罐列表 $M_u \subseteq M$ 。

(4) 对上述组包的建议热压罐 $k \in M_u$ 进行约束资源的校核。第1步: 在热压罐可用时间 T_m 段内为该组包选择在该热压罐上的开工和完工时间,若不存在,则将该组包所有零件加入待删除零件列表中; 第2步: 根据热压罐的开工时间计算零件工装需要占用的时间段,以此反推工装是否可以在选择的开工和完工时间内进罐,如果可以,则零件可进罐; 如果不可以,则将该零件加入待删除零件列表中,在计算工装占用时间时,脱模和铺叠工序必须要考虑工人正常工作时间; 第3步: 调用二维装箱算法校验热压罐面积是否满足组包内零件的工装面积总和,将超出热压罐内面积的零件加入待删除零件列表中; 第4步: 对可放入热压罐内的工装,校验热压罐的真空嘴和热电偶数量是否满足,若不满足,则将优先级最低的零件加入待删除零件列表中。

(5) 检验是否存在可加工的包,若存在多个,则选择对应热压罐建议优先级最高的包,若存在多个对应热压罐建议优先级相等的包计划,则选择开工时间最早的包计划,若开工时间相同,则选择可执行包包含最多零件的包计划; 若不存在,将因为工装不可用的零件加入不能排程的列表清单,将因为工装当前时间不可用的零件其最早可用时间设置为其工装的最早释放时间,其他零件则加入散件列表,删除该包,转步骤(3)。

(6) 校验选择的包计划是否可行,若可行,则根据

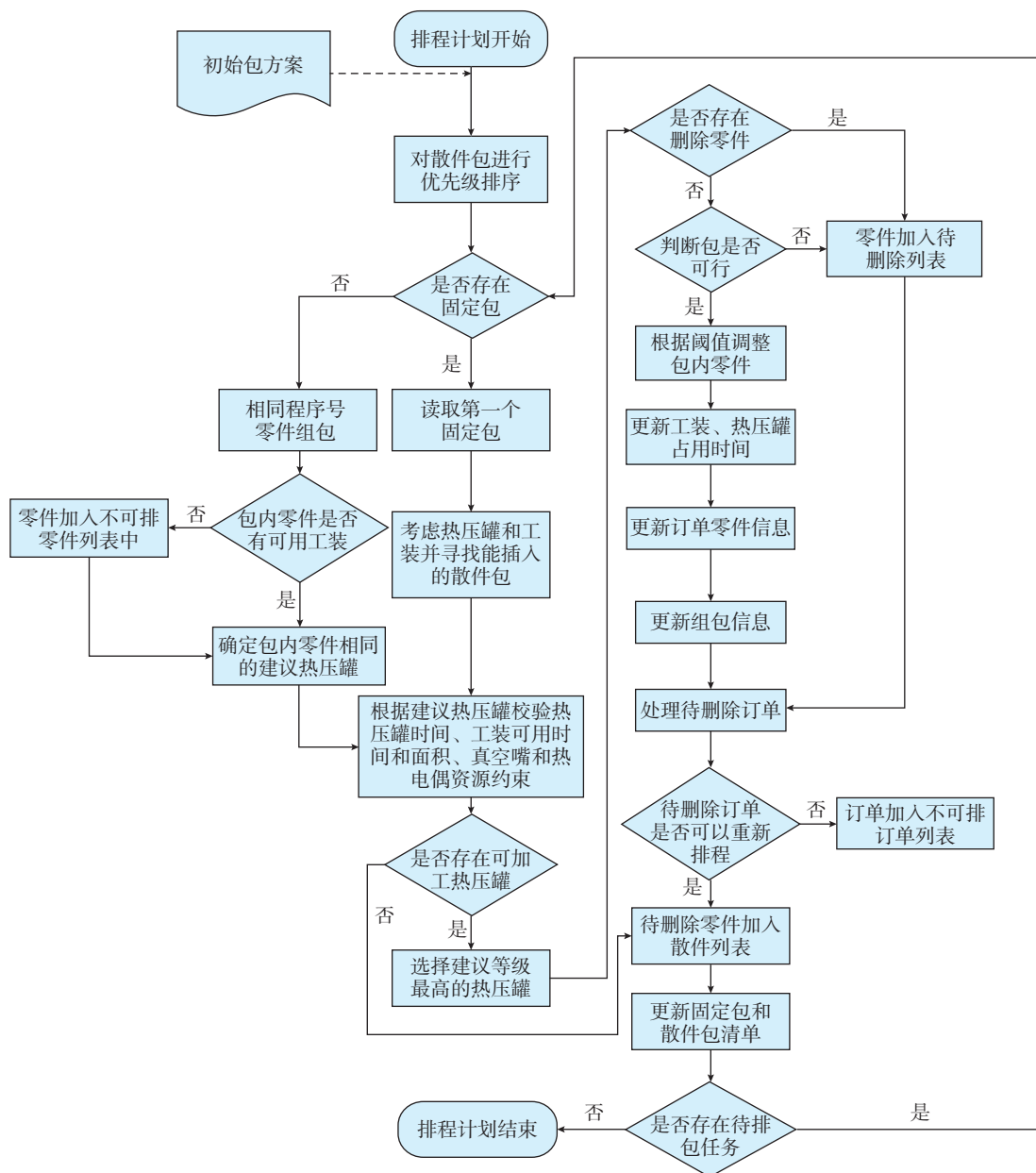


图3 进罐计划排程算法流程图

Fig.3 Flow chart of autoclave plan scheduling algorithm

该包选择的热压罐的零件数量和面积阈值对包内零件再进行调整；若不可行，则将该包内的零件全部加入散件列表中。

(7)更新热压罐设备和工装的占用时间,更新该包的属性,已排程订单的属性,并将因工装、工序、热压罐、工人时间等约束而删除的订单加入到不可排订单列表中,因为其他约束而删除的订单加入散件列表中继续进行排程。

(8)将散件订单加入到散件包中,更新固定包清单 S^* 和散件包清单 S_v 。检验是否还存在待排包任务,若存

在,转步骤(3),否则,结束算法;若不能继续排程,结束算法。

3 复合材料成型制造进罐计划排程方法的实现与应用

3.1 试验验证

假设热压罐基础信息如表2所示。固定包方案如表3所示,包含了零件图号、使用热压罐编号、建议工装序列号、工装长度、工装宽度以及工装方向、真空嘴和热电偶需求数量。各零件的工艺路线如表4所示,待排进

表 2 热压罐基础信息

Table 2 Basic information of autoclave

热压罐编号	名称	长 /m	宽 /m	高 /m	层数 /层	真空嘴实际数量 / 个	热电偶实际数量 / 个
15-1	15M	15.0	3.0	2	2	74	76
13-1	13M	13.0	3.0	2	2	76	76
12-1	12M	12.0	3.0	2	2	70	68

表 3 固定包方案

Table 3 Fixed package schemes

方案 ID	热压罐编号	包固化时间	零件图号	工装序列号	工装长度 /m	工装宽度 /m	工装方向	真空嘴需求数量 / 个	热电偶需求数量 / 个
1	13-1	5	D-173A001	GL173A-019	3	3	0	8	10
		5	D-173A002	GL173A-017	3	5	0	8	10
		5	D-173A003	GL173A-014	1	5	0	4	8
2	13-1	6	D-173A004	GL173A-012	8	2	0	8	12
		6	D-173A005	GL173A-010	2	2	0	4	8
		6	C1-223B001	GL223B-029	3	1	0	8	10
		6	C1-223B004	GL223B-022	4	1	0	12	14
		6	C1-223B005	GL223B-020	3	3	0	8	12
3	13-1	6	C1-223B003	GL223B-025	5	2	0	12	16
		6	D-173A004	GL173A-012	8	2	0	8	12
4	13-1	6	C1-223B002	GL223B-027	4	2	0	12	16
		6	D-173A005	GL173A-010	2	2	0	4	8

表 4 零件工艺路线

Table 4 Process route of parts

编号	零件图号	工序名称	工序类型	工序参数	生产程序号	工序时长 /h	前置非进罐工序时长 /h
1	C1-223B001	进罐	3	8	3	6.0	6.0
2	C1-223B002	进罐	3	8	3	6.0	6.0
3	C1-223B003	进罐	3	8	3	6.0	6.0
4	C1-223B004	进罐	3	8	3	6.0	6.0
5	C1-223B005	进罐	3	8	3	6.0	6.0
6	D-173A001	进罐	3	7	3	5.0	6.0
		进罐	3	7	5	5.0	5.0
7	D-173A002	进罐	3	7	3	5.0	6.0
		进罐	3	7	5	5.0	5.0
8	D-173A003	进罐	3	7	3	5.0	6.0
		进罐	3	7	5	5.0	5.0
9	D-173A004	进罐	3	8	3	5.0	6.0
		进罐	3	8	5	5.0	5.0
10	D-173A005	进罐	3	8	3	5.0	6.0
		进罐	3	8	5	5.0	5.0

罐计划订单如表 5 所示。

基于进罐计划排程算法,在单设备多机型的场景下,通过固定包和散件组包进行进罐计划排程。假设热压罐 13-1 在 2020/6/20 00:00:00-2020/6/22 00:00:00 都可用,热压罐每一罐计划之间间隔时间为 3 h。基于表 2~5 的基础数据,进罐计划排程步骤如下。

(1) 生成初始包。根据现有订单零件依次匹配初始包,并按照读入的固定包顺序排序,生成的初始包与

读入的固定包区别在于:固定包 2 中少了零件编号为 C1-223B005 的零件,同时,产生了散件 C1-223B004。

(2) 排程。按照产生的固定包顺序依次排程,并检验相应的热压罐资源和工装资源,若存在不满足资源的零件,则打入散件集合;而若散件中存在可以加入实际生产的包方案中时,则插入,得到进罐的相应布局示意图如图 4 所示。

(3) 散件打包。若还存在散件,则将剩余散件按一

表 5 订单清单
Table 5 Order list

ID	订单编号	零件图号	批次	架次	优先级	固定完成截止日期
1	2020-001	C1-223B001	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
2	2020-002	C1-223B002	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
3	2020-003	C1-223B003	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
4	2020-004	C1-223B004	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
5	2020-005	C1-223B004	1	2	2	2020/12/19 00:00:00
6	2020-006	D-173A001	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
7	2020-007	D-173A002	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
8	2020-008	D-173A003	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
9	2020-009	D-173A004	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
10	2020-0010	D-173A005	1	1	1	2020/6/22 00:00:00
11	2020-0011	D-173A001	1	2	1	2020/6/23 00:00:00
12	2020-0012	D-173A002	1	2	1	2020/6/23 00:00:00
13	2020-0013	D-173A003	1	2	1	2020/6/23 00:00:00
14	2020-0014	D-173A004	1	2	1	2020/6/23 00:00:00
15	2020-0015	D-173A005	1	2	1	2020/6/23 00:00:00

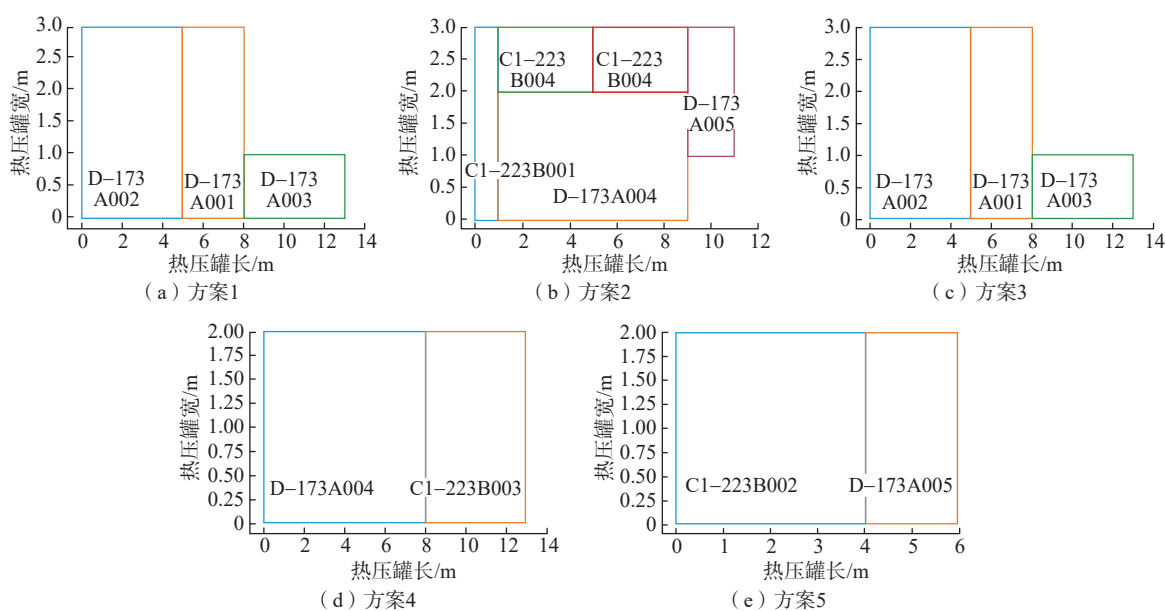


图 4 进罐方案布局图示

Fig.4 Layout of autoclave scheme

定优先级排序,并将和第1个散件相同程序号的零件当作1个固定包直接进行校验并加工,直至所有散件加工结束或超出计划期为止。

具体的进罐计划详细信息如表6所示,结合图4和表6,算法输出了进罐计划的开始时间、结束时间,使用的热压罐以及零件使用的工装信息,可以发现进罐计划排程算法以固定包方案为基础,配合散件组包,在可行

的进罐计划方案内寻找热压罐利用率最大的方案。

3.2 案例应用

将进罐计划排程方法应用于某复合材料零件制造企业的进罐计划生产排程中,依据其实际生产情况设置变量参数值,如表7所示。

分别从组包数、热压罐面积利用率、排计划用时3个方面进行数据对比,如图5所示。

表6 进罐计划详细信息
Table 6 Details of canning plan

ID	零件编号	开始时间	结束时间	热压罐	工装
1	D-173A001	2020/6/20 00:00:00	2020/6/20 05:00:00	13-1	GL173A-019
	D-173A002	2020/6/20 00:00:00	2020/6/20 05:00:00	13-1	GL173A-017
	D-173A003	2020/6/20 00:00:00	2020/6/20 05:00:00	13-1	GL173A-014
2	D-173A004	2020/6/20 08:00:00	2020/6/20 14:00:00	13-1	GL173A-012
	D-173A005	2020/6/20 08:00:00	2020/6/20 14:00:00	13-1	GL173A-010
	C1-223B001	2020/6/20 08:00:00	2020/6/20 14:00:00	13-1	GL223B-029
	C1-223B004	2020/6/20 08:00:00	2020/6/20 14:00:00	13-1	GL223B-022
	C1-223B004	2020/6/20 08:00:00	2020/6/20 14:00:00	13-1	GL223B-023
3	D-173A001	2020/6/20 17:00:00	2020/6/20 22:00:00	13-1	GL173A-019
	D-173A002	2020/6/20 17:00:00	2020/6/20 22:00:00	13-1	GL173A-017
	D-173A003	2020/6/20 17:00:00	2020/6/20 22:00:00	13-1	GL173A-014
4	C1-223B003	2020/12/19 01:00:00	2020/12/19 07:00:00	13-1	GL223B-025
	D-173A004	2020/12/19 01:00:00	2020/12/19 07:00:00	13-1	GL173A-013
5	C1-223B002	2020/12/19 10:00:00	2020/12/19 16:00:00	13-1	GL223B-027
	D-173A005	2020/12/19 10:00:00	2020/12/19 16:00:00	13-1	GL173A-011

表7 进罐计划算法变量参数
Table 7 Variable parameters of the canning plan algorithm

参数	值	参数	值
热压罐第1层面积阈值	0.8	热压罐第1层零件数量限制/个	10
热压罐第2层面积阈值	0.5	热压罐第2层零件数量限制/个	5
热压罐每罐的切换时间/h	2	工序间转换时间/h	2

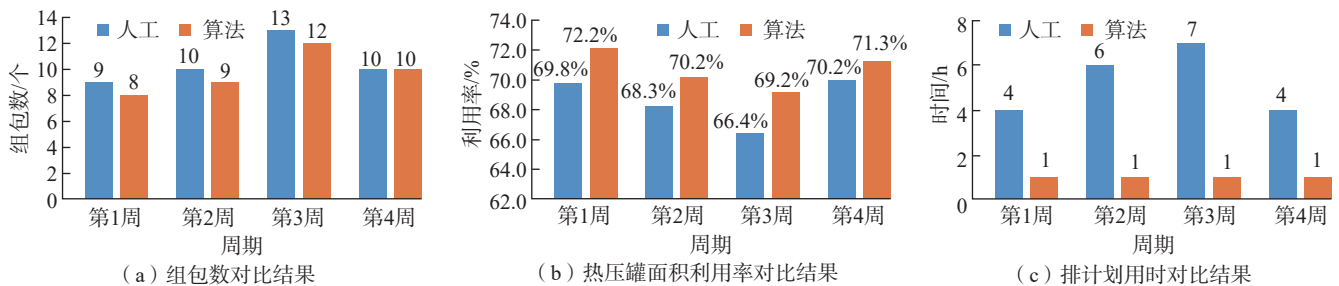


图5 组包数、热压罐面积利用率和排计划用时对比结果

Fig.5 Comparison of the number of package, autoclave area utilization rate and schedule time

通过算法排计划用时均为 1 h, 由于需要处理输入的订单以及设置订单的优先级, 实际算法进行进罐计划排程仅耗时不到 5 min, 显著地提高进罐计划的排程效率。前两项数据对比结果表明进罐计划排程方法应用于实际生产计划排程中可以有效提高设备的利用率, 由于实际生产设置了热压罐内面积利用的阈值以及零件数量的上限值, 利用率提高并不多。如果热压罐设备作为瓶颈资源限制产能时, 可通过调整参数值, 提高热压罐的设备利用率。

4 结论

本算法结合复合材料零件制造企业的实际生产情况, 提出了进罐计划排程的 9 大类共 14 个约束条件, 基于多因素约束对进罐计划排程方法进行研究, 建立模型并实现了进罐计划排程算法。多种约束的因素中, 一部分通过输入数据进行控制, 一部分通过变量进行控制, 一部分则在算法中控制, 充分考虑了生产车间的动态性, 使本算法具有很强的适应性, 解决了多因素约束下复合材料成型制作进罐计划排程的难题。相比于人工经验排程, 进罐计划排程算法将进罐计划排程的效率提高了 3 倍以上, 在有限范围内将热压罐面积利用率提高了 3% 左右。

参考文献

- [1] 赵子瑄. 浅析航空复合材料应用及发展[J]. 科技视界, 2014(7): 139, 218.
- ZHAO Zixuan. Brief analysis of application and development of aviation composite materials[J]. Science & Technology Vision, 2014(7): 139, 218.
- [2] 梁春秀. 航空复合材料技术发展现状及展望[J]. 军民两用技术与产品, 2015(8): 1.
- LIANG Chunxiu. Development status and prospect of aviation composite technology[J]. Dual Use Technologies & Products, 2015(8): 1.
- [3] 顾文波. 国外飞机结构复合材料应用与发展分析[J]. 国防技术基础, 2015, 1(1): 36–38.
- GU Wenbo. Application and development of composites on aircraft structural abroad[J]. Technology Foundation of National Defence, 2015, 1(1): 36–38.
- [4] 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, 4(7): 9–11, 15.
- CHEN Guohui, YE Wenhua. Research on production scheduling of Aeronautical composite workshop based on heuristic rules[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012, 4(7): 9–11, 15.
- [5] 施杰池. 基于 MES 的车间作业调度系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- SHI Jiechi. Research on job shop scheduling system based on MES[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [6] 孙志峻, 乔冰, 盘全科, 等. 具有柔性加工路径的作业车间批量调度优化研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(3): 348–354.
- SUN Zhijun, QIAO Bing, PAN Quanke, et al. Optimization of job shop batch scheduling with flexible machining path[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(3): 348–354.
- [7] 张晓东, 严洪森. 一类 Job-shop 车间生产计划和调度的集成优化[J]. 控制与策略, 2003, 18(5): 581–584.
- ZHANG Xiaodong, YAN Hongsen. Integrated optimization of production planning and scheduling for a class of job-shop[J]. Control and Strategy, 2003, 18(5): 581–584.
- [8] 刘建国. 混合流水线生产计划排程问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- LIU Jianguo. Research on production planning and scheduling problem in hybrid assembly line[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [9] GUPTA A K, SIVAKUMAR A I. Job shop scheduling techniques in semiconductor manufacturing[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2006(27): 1163–1169.
- [10] 王海宁, 何卫平. 面向实时排程的车间生产调度系统研究与实现[J]. 现代制造工程, 2007(12): 82–85.
- WANG Haining, HE Weiping. Research and implementation of workshop production scheduling system for real time scheduling[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(12): 82–85.
- [11] 万春辉, 闫艳, 武志军, 等. 面向车间生产动态调度的动态工作日制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(3): 102–104.
- WAN Chunhui, YAN Yan, WU Zhijun, et al. Research on dynamic working day system for dynamic scheduling of workshop production[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2006(3): 102–104.
- [12] LOU P, ONG S K, NEE A Y C. Agent-based distributed scheduling for virtual job shops[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(13): 3889–3910.
- [13] 张国庆, 梅中义. 飞机复合材料车间计划排产优化方法的研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(9): 68–72.
- ZHANG Guoqing, MEI Zhongyi. Research on the optimization method of aircraft composite workshop planning and scheduling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(9): 68–72.
- [14] 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. Aeronautical composite production planning and scheduling system based on constraint theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [15] 孙国恩. 基于约束理论的车间计划排产系统应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- SUN Guoen. Application Research of workshop planning and scheduling system based on constraint theory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [16] 令狐强, 钱绘宇. 基于军品生产的复杂约束过程订单排产算法研究与实现[J]. 信息通信, 2020(4): 132–134.
- LING Huqiang, QIAN Huiyu. Research and implementation of order scheduling algorithm for complex constrained process based on military production[J]. Information Communication, 2020(4): 132–134.

通讯作者: 孙琳, 工程师, 硕士。

(责编 晓月)