

# 飞机复合材料车间计划排产优化方法的研究

## Research on Planning Scheduling Method in Aircraft Composite Material Workshop

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 张国庆 梅中义

**[摘要]** 结合国内某飞机复合材料制造车间的实际生产特点,提出了针对复合材料车间计划排产的方法和步骤,并建立了基于启发式规则算法的优化排产模型。该排产方法将生产班组作为相对独立的生产单元,在设计上不仅充分考虑到复合材料生产的特点,而且对生产中出现的突发问题进行了相应的调整处理,使得排产方法更加适应复合材料生产的实际情况,最终提高了车间的生产效率。

**关键词:** 复合材料 计划调度 启发式规则算法 排产算法

**[ABSTRACT]** The methods and processes of planning schedule in the composite material workshop are given and relatively optimized scheduling function based on heuristic algorithm according to the reality of one of China aviation composite material workshop is established. This algorithm regards each of the production teams as a relatively independent unit. The algorithm is designed not only considering the characteristics of the production of composite material, but also dealing with sudden emergency, making the algorithm more practicable in the actual situation of the composite material workshop, and ultimately improve the productivity of the workshop.

**Keywords:** Composite material Planning scheduling Heuristic algorithm Scheduling algorithm

随着国家战略和国际市场对军用和民用飞机各种性能的要求越来越高,采用先进复合材料代替传统的铝合金和钛合金等航空材料是发展的必然趋势。伴随复合材料的大规模生产,复合材料制造车间不可避免地要遇到生产计划调度问题。

生产计划调度问题是伴随大生产的进程而产生的。随着企业的发展,人们深刻地认识到生产计划调度成为影响生产过程顺利进行的关键瓶颈之一,因而引起了国内外学者的广泛重视。

20世纪70年代发展起来的启发式规则算法,到80年代发展起来的智能优化算法都使得计划排产算法理论得到了很大的发展。然而,生产计划调度问题是一个极其复杂、难度相当大的优化算法问题<sup>[1]</sup>,也称 NP 难

题。许多智能优化算法,如禁忌搜索算法、模拟退火法和遗传算法等,从理论上来说能够得到问题的最优解。但是实际上这些智能优化算法或是在实际应用中比较困难,或是在求解车间工序问题上效果不明显<sup>[2]</sup>。在实际应用中,这些算法通常都有非常苛刻的限制条件和非现实假设,如初始值的设定、生产条件假设等。因此,对于复杂多变的车间生产环境来说,这些算法显然存在很大的局限性,难以得到符合车间实际生产和相对合理的排产结果。

相比之下,启发式规则算法是在一些信息和规则的启发下进行推理和计算,从而获得调度问题的近似最优解的方法。针对计划调度问题的 NP 特性,该算法在计算时间和求解效果之间进行了有效的折中,以较小的计算量来求得问题的近优解或者满意解,从而便于车间的实际应用。因此,启发式规则算法是目前在计划调度问题中应用最广泛的方法<sup>[3]</sup>。

车间生产任务复杂多变,动态随机性很大<sup>[4]</sup>,飞机复合材料车间更是如此。飞机类复合材料零件品种繁多、生产任务大,所以在选择优化算法时选择合理易行、符合实际生产条件的排产算法是最现实的和最有效的。

## 1 复合材料车间排产算法的选择

### 1.1 复合材料车间生产特点

飞机复合材料生产车间不同于其他行业的零件制造企业。复合材料零部件生产工序多,各工序之间又不是单纯的流水作业,加之工人手工劳动的比重较大,这就给排产增加了难度。图1列举了复合材料零件制造的主要工艺流程。

通过对国内某大型复合材料车间生产实际情况的深入调研,复合材料车间零件生产具有以下特点。

(1) 零件的加工顺序不是严格按照工序号从小到大依次开工生产的。比如,在图1中,下料10和蜂窝加工20可以同时开工,其他工序在开工之前也要提前做好生产准备工作。

(2) 零件的生产工序通常是相同的,不同零件同一工序的加工工时有所不同。

(3) 同批零件的交货期基本是相同的。

(4) 同批任务中某些零件存在优先生产的属性,即

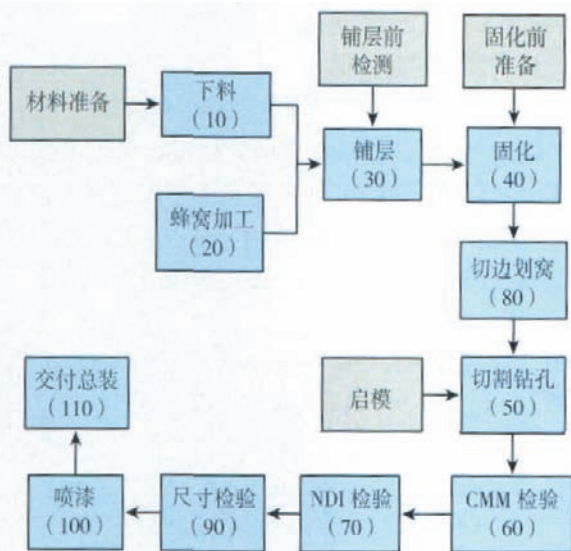


图1 复合材料零件制造的主要工艺流程

Fig.1 Main manufacturing process of composite parts

零件之间存在优先级。

(5) 复合材料零件生产主要靠工人手工作业,如铺层、蜂窝打磨和切边等。

总之,复合材料车间的计划调度从总体上可看作是流水车间(Flow-Shop)调度问题。流水车间的生产特点是每一个生产班组在某个时刻只能加工某个零件的某道工序,且只能在该零件的上一道工序加工完成后才能开始本道工序的加工。

## 1.2 排产算法的选择

基于复合材料车间的上述生产特点,综合考虑目前各种优化排产算法的适用特点和难易程度,选择启发式规则算法来解决复合材料车间计划调度问题是最可行、最现实的方法。

启发式规则算法是一个基于直观或者经验构造的算法,在可以接受的花费(时间、占地空间等)下给出待解决组合优化问题每一个实例的一个可行解<sup>[5]</sup>。一般来说,只要预先定义的优化规则符合车间生产的实际情况,启发式算法都可以得到相对合理和满意的排产结果。

在定义排产规则时,将各个班组看作是相对独立的生产单元。任务不是分配给该班组所使用的设备或者工位上,而是直接分配给各个班组。各生产班组在获取生产任务以后严格按照计划要求及时完成生产任务。

在排产规则中,不仅要充分考虑到可以同时开工的工序,而且要充分考虑到同批零件中不同零件的优先级。这不但可以消除不必要的生产等待时间,也使得一些重要件或者关键件提早完工,从而优化排产结果和满足车间生产的实际要求。当然,算法也要考虑到交货期的限制条件,对整批零件进行完工时间的计算,如果完工时间无法满足交货期的要求,则可以通过调整相关参

数,重新进行排产。经过若干次反馈,最终就可以得到相对满意的排产结果。

## 2 排产规则和算法步骤

### 2.1 排产规则及算法思想

根据车间的生产任务,容易分解并获得各个生产班组的任务量。对于首开班组来说,根据各工序任务的加工工时和对应各零件的优先级,通过优化规则算法可以得到该班组最优的任务开工顺序,从而保证本班组所有任务得到最快完工。首开班组的任务排产规则如下:

(1) 所有任务严格按照优先级从高到低顺序进行开工生产,即优先级越高越先开工。

(2) 当存在优先级相同时,按照各任务的加工工时从小到大进行开工生产,加工工时越少越先开工,即SPT规则(Shortest Processing Time)。

(3) 当优先级和加工工时都相同时,则按照各零件所属架次从小到大进行开工生产,即架次越小越先开工。

(4) 当优先级、加工工时、所属架次都相同时,按照各零件号递增顺序进行开工生产。

(5) 当多道工序的优先级不存在时,视其优先级相同,转第(2)步。

根据上述规则,即可获得首开班组所有工序任务的开工顺序,再由开工时间( $D_s$ )和各工序的加工工时( $T_i$ ),即可计算出该班组所有工序任务的开工时间( $T_s$ )和完工时间( $T_e$ )。

后续班组生产任务的排产规则总体上采取“先完工,先开工”的顺序。即统计上一班组所有零件任务的完工时间,并按照其完工时间进行一个按时间递增的排序。这个顺序就是该班组对应零件工序任务的大致开工顺序。所谓的大致开工顺序是指该顺序不是最终的开工顺序,只是一个大致开工顺序,该顺序还需要进一步的调整和优化。因为后续班组在生产中肯定会遇到多道工序可以同时开工的情况,这时必须对这些工序的开工顺序做进一步优化,以达到最佳的排产效果,否则可能会出现严重的生产等待问题。调整优化规则与起始班组的排产规则一样,详见首开班组的排产顺序。

后续班组各工序任务的开工时间和完工时间为:第一个工序任务的开工时间一定是该零件上一道工序的完工时间,其完工时间就是开工时间加上本道工序的加工工时。该班接下来任务的开工时间是需进行选择的,首先获取该工序对应零件的上一道工序的完工时间,其次获取本班组上一任务的完工时间。显然应选择两者中时间较晚的作为任务的开工时间,完工时间就是开工时间加上加工工时。以此类推,即可确定后续班组所有

任务的开工时间和完工时间。

最后,提取最末班组最后一道工序的完工时间( $T_l$ ),将它与交货期( $D_e$ )作比较。如果 $T_l < D_e$ 或者任务量超过生产班组的实际负荷能力,则可以修改参数,重新进行排产,直到获得满意的排产结果为止。

整个排产算法的优化规则综合运用了优先权规则、SPT 规则和先到者优先规则,从而使排产算法更加具有

科学性和实用性。

## 2.2 排产算法函数流程

基于以上所述的排产规则和排产思想,即可建立复合材料车间计划排产的优化函数模型。优化函数的核心主要包括首开班组任务排产和后续班组任务排产 2 部分,如算法流程图 2 所示。

算法流程图 2 中使用符号的说明如下:

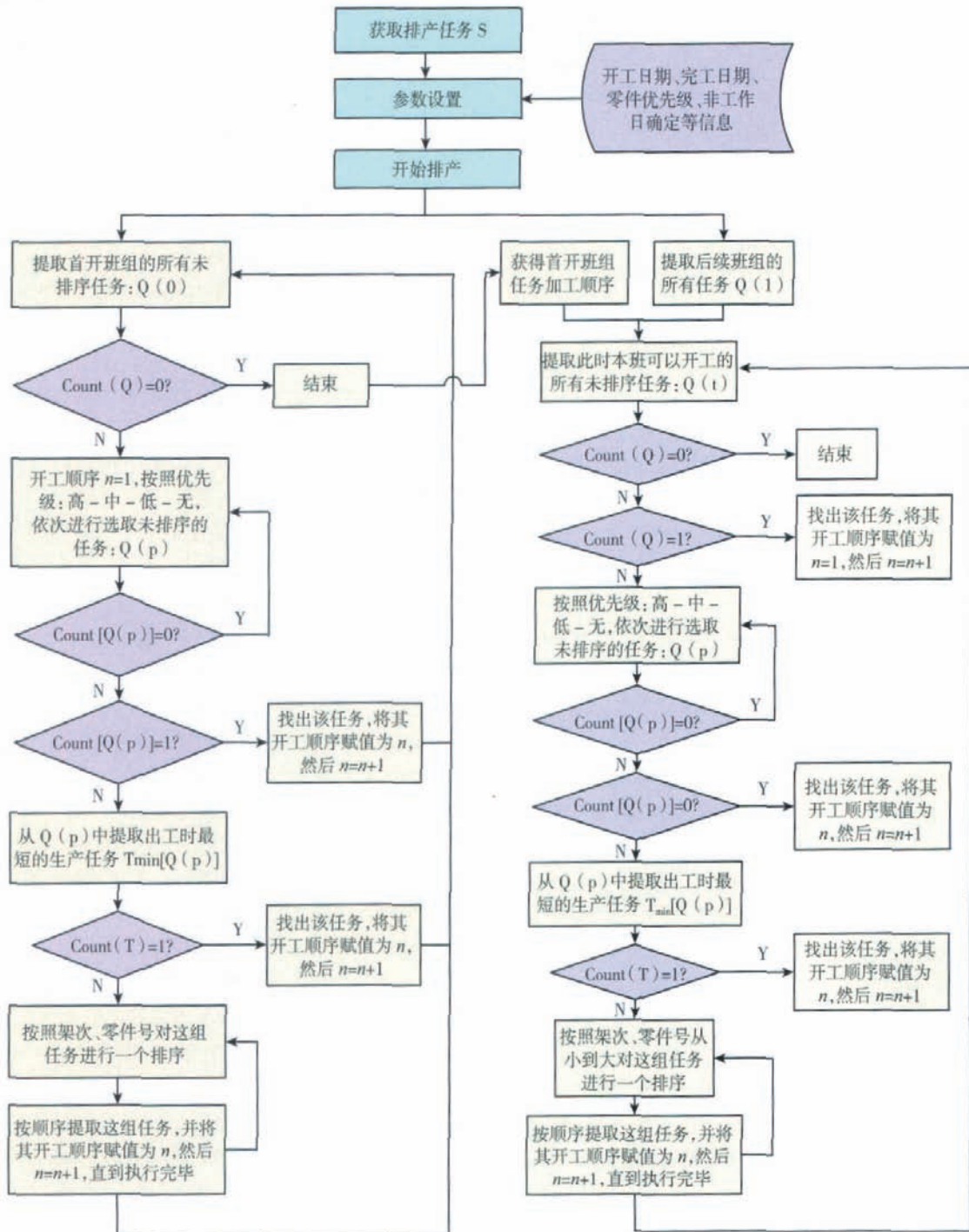


图2 计划排产优化函数流程

Fig.2 Flow of the optimized function

(1)  $Q(0), Q(1)$ : 表示前后 2 个班组未排序的工序任务;

(2)  $Q(p)$ : 表示在本班组中满足某一优先级的所有未排序的工序任务;

(3)  $T_{\min}[Q(p)]$ : 表示满足同一优先级的所有未排序任务中加工工时最少的工序任务;

(4)  $n$ : 计数器符号, 用于保存开工顺序;

(5)  $\text{Count}(X)$ : 统计满足给定条件下任务  $X$  中所包含的任务数量;

(6)  $Q(t)$ : 表示在某一时刻, 某班组可以同时开工的所有未排序工序任务。

图 2 中所示的排产函数流程图就是基于启发式规则算法建立起来的。排产函数的核心算法包括以下步骤:

统计所有未排序任务的总数  $\text{Count}(Q)$ ;

if  $\text{Count}(Q) = 0$  then

break, 转向下一个班组

end if;

if  $\text{Count}(Q) > 0$  then, loop 循环

从任务中提取满足某一优先级的任务  $Q(p)$

end if;

if  $\text{Count}[Q(p)] = 1$  then

任务顺序赋值为  $n, n = n + 1$

end if;

if  $\text{Count}[Q(p)] > 1$  then

提取  $Q(p)$  中加工工时最少的任务  $T_{\min}[Q(p)]$

end if;

if  $\text{Count}(T) = 1$  then

任务顺序赋值为  $n, n = n + 1$

end if;

if  $\text{Count}(T) > 1$  then

按任务的所属架次和零件号进行从小到大赋予加工顺序  $n, n = n + 1$

end if;

重复 loop 循环, 直到该班组所有任务排序完成。

### 3 排产算法在车间的具体应用

#### 3.1 系统总体介绍

车间制造执行系统(简称 MES)已经在该航空复合材料车间广泛应用。MES 系统主要的职能是负责车间生产管理和调度执行管理, 它处于计划层(ERP)和生产控制层(SFC)之间的执行层。系统的关键点在于使“计划”与“生产”密切配合, 企业和车间管理人员可以在最短的时间内掌握生产现场的变化, 做出准确的判断和快速的应对, 保证生产计划顺利进行。

自动排产系统是 MES 系统中的一个子系统, 该排产系统以 MES 系统作为平台, 并与 MES 系统完美融合, 对复合材料车间的生产计划调度编排起到了重要作用, 大大提高了计划员和调度员的劳动效率。自动排产子系统平台如图 3 所示。

该排产系统工作流程可分为四大块, 如图 4 所示。

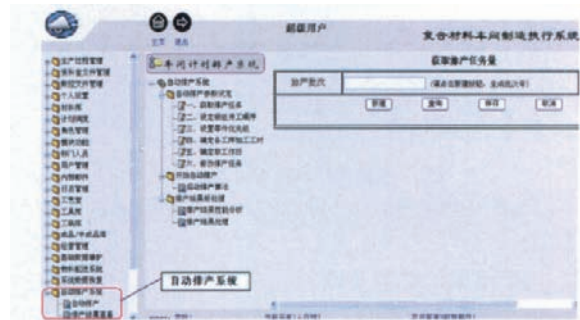


图3 自动排产系统平台

Fig.3 Platform of automatic scheduling system

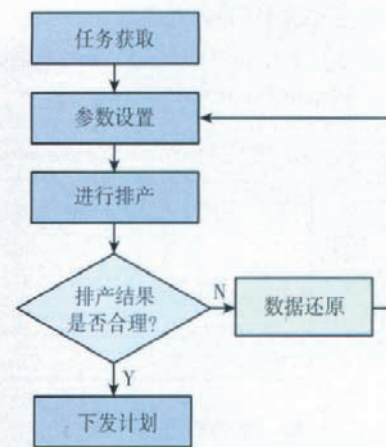


图4 自动排产系统工作流程

Fig.4 Workflow of automatic scheduling system

(1) 任务获取。从生产任务中提取需要编制计划的生产任务。

(2) 参数设置。对提取出来的生产任务进行相关参数设置, 包括零件优先级、加工工时和工作日历编排等。

(3) 进行排产。根据排产算法规则对排产任务进行自动编排, 并获得排产结果。

(4) 排产结果分析。根据车间实际生产情况和排产性能参数对排产结果的实用性进行分析, 如果满足车间生产条件, 则下发计划, 准备生产; 反之, 则修改参数, 重新排产, 直到获得满意的排产结果为止。图 5 为转包机型波音 787 的任务排产结果。

图 5 所示的排产结果详细给出了所有工序任务的

开工时间、完工时间和状态等信息。当排产结果下发以后,各生产班组即可获得本班组的任务的开工和完工时间列表。

任务ID	任务名称	开工时间	完工时间	状态
1	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
2	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
3	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
4	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
5	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
6	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
7	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
8	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
9	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
10	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
11	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
12	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
13	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
14	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
15	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
16	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
17	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
18	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
19	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成
20	下料	2009-04-20 08:00:00	2009-04-20 08:00:00	已完成

图5 自动排产系统的验证结果  
Fig.5 Result show of automatic scheduling system

3.2 排产结果的性能参数

排产结果的优劣除了与实际生产条件有关以外,还与排产本身的性能参数有关。可以说,排产算法得到的性能参数是最直接体现算法优劣的指标。自动排产系统在排产过程中详细统计了排产结果的各个参数,包括生产等待时间、完工日期、提前完成时间和各个班组的的生产等待时间等。图5所示排产结果实例的性能参数如图6所示。

任务ID	任务名称	等待时间	提前完成时间
1	下料	0	2009-07-03 18:00:00
2	下料	0	2009-07-03 18:00:00
3	下料	0	2009-07-03 18:00:00
4	下料	0	2009-07-03 18:00:00
5	下料	0	2009-07-03 18:00:00
6	下料	0	2009-07-03 18:00:00
7	下料	0	2009-07-03 18:00:00
8	下料	0	2009-07-03 18:00:00
9	下料	0	2009-07-03 18:00:00
10	下料	0	2009-07-03 18:00:00
11	下料	0	2009-07-03 18:00:00
12	下料	0	2009-07-03 18:00:00
13	下料	0	2009-07-03 18:00:00
14	下料	0	2009-07-03 18:00:00
15	下料	0	2009-07-03 18:00:00
16	下料	0	2009-07-03 18:00:00
17	下料	0	2009-07-03 18:00:00
18	下料	0	2009-07-03 18:00:00
19	下料	0	2009-07-03 18:00:00
20	下料	0	2009-07-03 18:00:00

图6 排产结果的性能参数  
Fig.6 Performance parameters of the scheduling result

系统根据排产的性能参数对排产结果也会给出一个综合的评价指标。各个生产班组具体的等待时间系统也会相应地统计出来。等待时间是本班组从任务开工到完工过程累积的等待时间。总等待时间越长表示排产过程越不合理。然而,生产等待时间是班组生产过程中不可避免出现的,一般来说只要任务能够提前完工,生产等待时间可以不予考虑。

4 突发问题处理方法

在实际生产过程中,车间生产不可避免地会受到车间外部或者内部不可预知因素的影响,从而使得原排产结果无法进行下去或者难以进行下去。在面对这些困境时,本排产系统对这些突发问题都做出了充分的考虑,使得在遇到各种情况时系统都可以做出及时应对,

满足车间生产顺利进行。  
车间实际生产中常常会遇到三大类突发问题,具体包括以下3类:

(1)原材料短缺和设备故障等。  
在这种情况下,产生的问题主要是生产任务不能如期完成,即出现生产延误现象。系统的处理方法是将未完成的任务的完工时间依次推迟某一给定的时间,原任务的开工顺序保持不变。

(2)交货期变更和生产能力过载等。  
如果遇到交货期变更(提前)或者生产能力过载等问题,则需要对剩余未完成的任务进行重新排产,以满足新的排产要求。

(3)订单变化和紧急件插入等。  
如果订单任务发生变化或者紧急件插入,那么生产任务就会发生改变,此时需要重新获取未排产任务,并设置相关参数,重新排产。为了保证插入的紧急件能够提前完工,需要设置其优先级为最高。  
突发问题的妥善解决使得排产系统具有一定的灵活性和车间适用性,也是本系统一个优势所在。

5 结束语

本算法结合国内飞机复合材料车间的实际生产特点,将启发式规则算法成功用于飞机复合材料车间计划排产中。自动排产算法以复合材料车间的实际生产为根本出发点,综合考虑了影响复合材料生产顺利进行的各种突发因素,并提供了相应的解决措施,从而使得排产系统具有很强的车间适用性,符合复合材料车间生产的实际要求,最终提高了车间的生产效率。该算法也对计划排产算法的理论研究和起到积极的借鉴和促进作用。

参考文献

[1] 周亚勤,李蓓智,杨建国.调整时间与工序顺序相关的Job Shop 调度优化方法研究.中国机械工程,2005(5):914-918.  
[2] 谭夏梅,何宝新.启发式算法在单件车间工序排序问题中的应用.现代机械,2002,39(2):10-12.  
[3] 韦平.SMT 车间排产优化的研究[D].西安电子科技大学,2007.  
[4] 过纯中,乔非,李莉.独立于模型的生产调度算法及其.NET 组件.江南大学学报,2006(8):403-407.  
[5] 邢文训,谢金星.现代优化计算方法.北京:清华大学出版社,1999:250-267.  
[6] 王凌.智能优化算法及其应用.北京:清华大学出版社,2001.  
[7] Graves S C. A review of production scheduling. Operations Research, 1981, 29(4): 646-675.  
[8] Witrock. An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines. Operations Research, 1988, 36: 445-453. (责编 淡蓝)