

飞机复合材料部件装配调度算法研究

陈致祥, 叶文华

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:以优化飞机复合材料部件装配顺序、缩短部件装配时间为目标, 构建了复合材料部件装配调度模型, 提出了一种启发式算法与禁忌搜索算法相结合的调度算法(HTA-AJSP), 并对其进行了优化, 通过采用变邻域搜索和禁忌规则, 很好地避免了算法搜索陷入局部最优。通过分析与实践验证, 并与启发式算法和局部搜索算法进行比较, 所提出的算法在产品装配调度优化问题上取得了比较满意的效果, 缩短了装配周期, 提高了装配效率。

关键词:装配调度; 目标函数; 禁忌搜索; 周期

中图分类号: TH166

文献标识码: A

文章编号: 1672-1616(2012)07-0001-04

在飞机制造过程中, 增加复合材料的应用是一种发展趋势。复合材料装配作为复合材料生产的最后环节, 其生产进度直接影响复合材料零部件的及时交付。

一个合理有效的装配作业排产方法, 能够最大程度地提高资源利用率, 降低生产成本, 缩短装配周期。与一般的机械产品相比, 飞机装配过程有其独特之处^[1], 如飞机装配是按客户订单进行计划生产, 装配严格依照 AO (Assembly Order, 装配指令) 工艺进行。飞机装配调度是一个典型的 NP-hard 问题。针对装配问题国内外专家学者做了大量的研究, 采用局部搜索算法、遗传算法、分层法、启发式算法、蚁群算法等方法实现了装配调度优化, 如: Ugur Ozcan 等应用局部搜索算法对双边装配线平衡问题进行优化, 大大地提高了装配效率^[2]; 闫振国等提出了一种求解批量作业最优排产方案的图解蚁群算法, 快速获取批量作业的最优排产方案^[3]; 黄泽森等针对有交货期限要求的 Job-Shop 工件装配调度问题, 提出了一种逆序初排启发式调度方法, 很好地解决了工件的按期交货问题^[4]; 金锋赫等针对自动与手控设备混合的装配作业车间, 设计了装配作业和设备特性相结合的生产调度规则, 缩短了作业车间的平均流动时间, 减少在制品库存^[5]。

飞机复合材料部件装配除具有飞机装配的特点外, 还具有自身特点, 如: 装配按单架次组织生产; 装配在一个大的装配型架上进行, 装配型架细

分为多个装配工位, 往往多道装配工序共用同一工位, 合理安排各工序在各工位的装配顺序, 直接影响装配周期, 而就目前复合材料加工厂的生产而言, 装配先后主要依赖于人工经验, 没能从整个部件装配周期优化的全局角度考虑, 装配效率不高。本文针对复合材料装配车间单个产品装配周期长、生产效率不高的问题, 以缩短装配周期为目标, 根据融合启发式算法求解速度快及禁忌搜索算法全局优化的优点, 提出一种新的调度算法, 定义为 HTA-AJSP (Heuristic-tabu Algorithm For Assembly Job Shop Scheduling Problems) 算法, 并对装配过程进行优化, 以提高装配效率。

1 装配调度模型的构建

图 1 为典型的某机型垂尾部件 A 的装配工艺结构树, 在这里, 定义每一个 AO 对应为一个装配操作, 图 1 中 AO_{*h*} 表示装配操作。

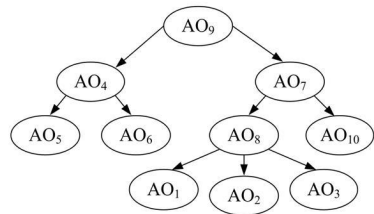


图 1 垂尾装配图

根据该装配工艺结构树可将部件 A 的装配问题描述为: 部件 A 由 n 个装配操作 AO₁, AO₂, ..., AO_{*n*} 装配而成, 并且父节点与子节点之间有先后约

束关系, n 个装配操作在 L 个装配工位 M_1, M_2, \dots, M_L 上装配完成。图 2 为部件 A 的装配工位与装配操作的对照关系图。

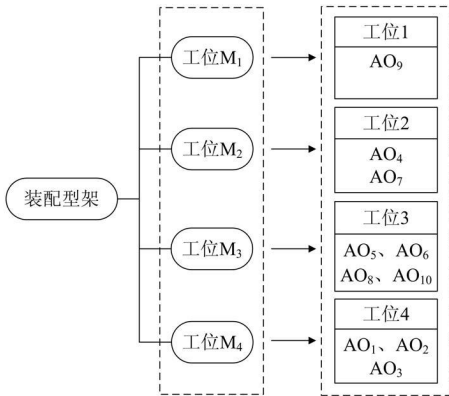


图 2 工位与 AO 对照图

定义 1: 装配树从最底层节点向最顶层节点追溯, 途经同一路径的节点构成一装配路径 J , 如路径 $AO_5 \rightarrow AO_4 \rightarrow AO_9$ 。

对部件 A 而言, 从底层到顶层, 可以构建出所有的装配路径 $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 对于装配操作 AO_h , 根据其在装配路径 J_i 所处的位置表示为 AO_{ij} , 其加工工位为 $M_k (k = 1, 2, \dots, L)$, 路径 J_i 由 m 个装配操作 $AO_{i1}, AO_{i2}, \dots, AO_{im}$ 组成。装配操作 $AO_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 的可加工工位集合 μ_{ij} 为单元元素集, 即 $|\mu_{ij}| = 1$, 其装配时间为 p_{ij} , 物料配套等待时间为 s_{ij} , t_{ij} 表示装配操作的开始时间。路径 $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 需符合预先给定的装配工艺顺序要求, 即 $AO_{i1} \rightarrow AO_{i2} \rightarrow \dots \rightarrow AO_{in}$, 另外, 对于父节点装配操作而言, 只有在其所有子节点装配操作已完成的情况下, 才能进行装配。

部件装配过程应满足如下约束:

a. 不可中断约束。工件的任何一道装配操作一旦开始就不能中断, 直至装配完成。

b. 工位惟一性约束。任一装配操作可选择的加工工位惟一; 一个工位同一时刻只能进行单个装配操作 AO_i 的装配。

c. 装配操作 AO_i 惟一性约束。一个装配操作 AO_i 同一时刻只能在一个工位上装配。

d. 父子 AO_i 层次约束。对于父节点装配操作 AO_i , 只有在其所有子节点装配操作 AO_i 都已完成装配的情况下, 才具备开工的条件。

e. 物料配套完整性约束。对于任一道装配操作而言, 只有在其相应物料配套都已齐备的情况下, 才能进行装配, 涉及物料配套等待时间。

f. 部件装配惟一性约束。装配型架的部件装配工作按单架次组织生产, 只有当一个架次完成后, 才能进行下一架次的装配。

在满足上述各项约束条件下, 确定各装配操作 AO_i 的加工开始时间及加工顺序, 使得复合材料部件的装配周期 C 最短。定义路径 J_i 的总时间为 TK_i , 则

$$TK_i = \sum p_{ij} + \sum s_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

$$C = \max\{TK_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$$

目标函数为:

$$C_{\max}^* = \min(C_k) (k = 1, 2, \dots, L, L \text{ 为所有可行调度解的总数})$$

即以获得最短的装配周期为目标。

约束条件如下:

$$s.t. t_{ij} \geq 0$$

$$t_{ij+1} - t_{ij} \geq p_{ij} + s_{ij} + s_{ij+1}$$

$$|\mu_{ij}| = 1$$

$$n_p < L < n$$

其中: n_p 为装配人数; n_k 为同一时刻在工位 M_k 上加工的工序数。

2 调度算法

鉴于优先分配启发式算法^[6]是目前求解作业车间调度问题较好的启发式算法之一, 这里采用优先分配启发式算法获得装配初始解。

优先分配启发式算法的基本思路是对于一个给定的部分调度, 通过识别所有的加工冲突, 即竞争同一个机器的工序, 然后在每一个阶段采取一些步骤并以多种可能的方法解决这些冲突。在每个阶段, 选择一个工序加入到部分调度中, 工序之间的冲突用优先分配规则解决。这里, 根据工序所处的路径中后续工序的总时间长度大小进行分配, 后续工序的总时间长度越大, 就优先给予分配, 以减小各装配路径的时间进度差距, 以求缩短装配周期。

TS 算法^[7] (Tabu Search, 禁忌搜索) 最早是由 Glover 在 1986 年提出, 它的实质是对局部邻域搜索的一种拓展。TS 算法通过模拟人类智能的记忆机制, 采用禁忌策略限制搜索过程陷入局部最优来避免迂回搜索, 同时引入特赦准则来释放一些被禁忌的优良状态, 以保证搜索过程的有效性和多样性。

本文以获得最短的部件装配时间为目标, 用优先分配启发式算法获得初始解, 再用 TS 算法进一

步进行优化。在采用TS算法求解Job-Shop调度问题的迭代过程中,设当前解表示为 σ ,由解 σ 变换为另一解的移动表示为 v ,当前解 σ 的邻域 $N(\sigma)$ 中与移动 v 对应的一个解表示为 $Q(\sigma, v)$,解 σ 的所有移动的集合表示为 $V(\sigma)$,目标函数 C_{\max} 为获取产品装配的理想装配周期。

a. 邻域结构。

本文采用变邻域结构方法获得解的邻域,以便更好地避免陷入局部最优。

定义 1: 调度解为每一工位 $M_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 上相应的操作序列 w 的集合 $\sigma = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

定义 2: 沿任一调度方案对应的析取图上的任一条关键路径,依次将在不同机器上的操作划入不同的相应操作集合,可形成操作集合序列 $(B_1 B_2 \dots B_r)$,其中,操作集合 B_i 和 B_{i+1} 为相邻操作集合,操作 $B_i (1, 2, \dots, r)$ 集合称为块。

邻域结构构造方法 1: 对当前解 $\sigma = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 从中任选一操作序列 w_i , 交换其中 2 个相邻操作的加工顺序作为解 σ 的邻居, 所有上述邻居构成解的邻域 $N_1(\sigma)$ 。

邻域结构构造方法 2: 该邻域结构定义方法最先由 Nowicki 等人^[8]提出,可描述为,若沿当前解对应的析取图上的一条关键路径形成的块序列为 $(B_1 B_2 \dots B_r)$, 则可通过交换任意一个块的边界操作对,以形成当前解的邻居,所有上述邻居构成解 σ 的邻域 $N_2(\sigma)$ 。

采用上述邻域结构定义方法所生成的当前解 σ 的邻域 $N_2(\sigma)$ 内包含解的数目为

$$\min\{1, |B_1| - 1\} + \min\{1, |B_r| - 1\} + \sum \min\{2, |B_i| - 1\} (i = 2, \dots, r - 1)$$

变邻域构造基本思路: 对于解 σ , 优先用方法 2 进行邻域构造, 当方法 2 领域中不存在比当前解更好解时, 陷入局部最优, 这时采用方法 1 进行邻域构造, 在邻域中选择一个新解, 再次进行变邻域搜索, 以跳出局部最优。

b. 禁忌表。

长度为 L 的禁忌表可表示为 $T = (T_1, T_2, \dots, T_L)$, 其中 $T_L (j = 1, 2, \dots, L)$ 为禁忌对象, 即一个移动。

禁忌表采用先进先出的队列来实现, 即当一个新的禁忌对象 T_{new} 加入禁忌表时, 禁忌表中原有禁忌对象依次向前移动, 即 $T_i = T_{i+1} (i = 1, 2,$

$\dots, L - 1)$, 而新加入的禁忌对象 T_{new} 位于禁忌表的末端, 即 $T_L = T_{\text{new}}$ 。其中, 一个移动 v 加入禁忌表 T 时用 $T \oplus v$ 表示。

c. 特赦规则。

采用基于目标函数值的特赦规则。当邻域候选集中某个解是迄今搜索到的最好解时, 若该解对应禁忌表中的某禁忌对象, 则从禁忌表中解禁该禁忌对象。

d. TS 算法流程。

基于上述所设计的禁忌搜索中各关键要素, TS 算法的流程可描述如下:

Step 1: $k = 0$, 产生初始可行解 σ_0 (采用启发式算法产生), 令 $C_{\max}^* = C_{\max}(\sigma_0)$, $\sigma^* = \sigma = \sigma_0$, $T = \Phi$, 其中, σ^* 为迄今搜索到的最好解。

Step 2: 令 $k = k + 1$, 根据相应的邻域定义方法, 确定集合 $V(\sigma)$ 。优先用方法 2 构造邻域, 若 $V(\sigma) = \Phi$, 则改用方法 1; 若 $V(\sigma) \neq \Phi$, 则 σ 即为最优解, 算法终止。

Step 3: 确定邻域候选集 $A(\sigma)$, 并选择 $\sigma_n = Q(\sigma, v_n) \in A(\sigma)$, 使得下式成立, 即

$$C_{\max}(Q(\sigma, v_n)) = \min\{C_{\max}(Q(\sigma, v)) \mid v \in V(\sigma) \mid A(\sigma) = \{Q(\sigma, v) \mid v \in V_A(\sigma) \mid\}$$

Step 4: 更新禁忌表 $T = T \oplus v_n'$, 并令 $\sigma = \sigma_n$, 若 $C_{\max}(\sigma) < C_{\max}^*$, 则令

$$\sigma^* = \sigma \\ C_{\max}^* = C_{\max}$$

Step 5: 若 $k \leq K_{\max}$, 则返回 Step 2, 否则算法终止, 其中, K_{\max} 为算法的总迭代次数。

3 实例研究

本文以某机型垂尾部件装配为例, 进行算法验证, 其AO关系如图1所示, 其他相关数据见表1。

采用优先分配启发式算法获得初始解 $\sigma_0 = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (\{1\ 3\ 2\}, \{10\ 5\ 8\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$, 定义禁忌长度为 2。与初始解对应的析取图如图 3 所示。

关键路径是析取图中从起点到终点的最长路径, 它的长度为调度解的最大完工时间。在调度问题中, 一般邻域结构的移动只能通过对关键路径上的工序的扰动产生, 这样更有可能缩短当前解的最大完工时间。

从图3可以看出, $\{1, 8, 7, 9\}$ 为关键路径。由

表 1 垂尾部件装配物料、工艺、工位及工时对照表

工序	AO ₁	AO ₂	AO ₃	AO ₄	AO ₅	AO ₆	AO ₇	AO ₈	AO ₉	AO ₁₀
物料	XX-3-10-A	XX-3-10-B	XX-3-10-C	XX-3-O	XX-3-1-A	XX-3-1-B	XX-3-50H	XX-3-10H	XX-3-OH	XX-3-20H
工位	4	4	4	2	3	3	2	3	1	3
工时	12h	4h	6h	20h	4h	8h	24h	8h	24h	18h

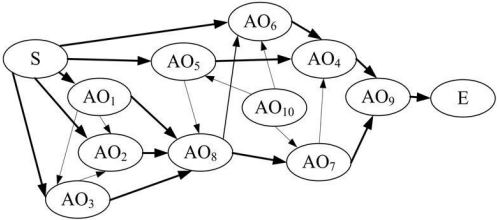


图 3 初始解对应析取图

这条关键路径可形成块序列 $(\{1\}, \{8\}, \{7\}, \{9\})$ ，由此可看出， $|B_i| = 1$ ，此时按照邻域构造方法 2 得到的邻域 N_2 为初始解本身，陷入局部最优，故采用方法 1 进行邻域构造。初始解 $\sigma_0 = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (\{1\ 3\ 2\}, \{10\ 5\ 8\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ ， $C_{\max} = 98h$ 。按方法 1 获得一个邻居 $\sigma_1 = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (\{1\ 3\ 2\}, \{8\ 5\ 10\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ 。采用方法 1，可得到当前解 (w_1, w_2, w_3, w_4) 的所有邻居，构成当前解的邻域。邻域中加工序列 $(\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 10\ 8\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ 对应的目标函数值 98h 最小，且此禁忌表为空，从而取 $\sigma^* = \sigma = (\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 10\ 8\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ ， $C_{\max} = 98h$ ，然后将由解 σ 变换为 σ^* 所需交换的工件对 (5 10) 加入禁忌表，得到更新后的禁忌表 $T = (5\ 8)$ 。在新解的基础上进行第二次邻域搜索，得到下个邻域的最优解为 $(\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 10\ 6\ 8\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ ，对应的目标

函数值 106h 最小，从而取 $\sigma^* = \sigma = (\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 10\ 6\ 8\}, \{7\ 4\}, \{9\})$ ， $C_{\max} = 106h$ ，此时禁忌表禁忌长度为 1，故将交换的工件对 (8 6) 加入禁忌表，得到更新后的禁忌表 $T = (5\ 10, 8\ 6)$ 。

通过多次迭代，最终获得最优解 $\sigma = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 6\ 10\ 8\}, \{4\ 7\}, \{9\})$ ， $C_{\max} = 86h$ 。调度结果的甘特图如图 4 所示。

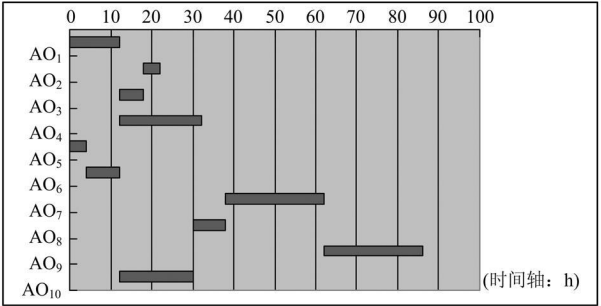


图 4 最终解对应甘特图

在多次对垂尾部件装配排程方案进行邻域搜索计算过程中，通过采用变邻域结构进行搜索，避免算法陷入局部最优，同时，通过使用禁忌表，缩小邻域范围，避免了重复的搜索，提高了算法的效率。针对垂尾部件装配实例，将 HTA-AJSP 算法与启发式算法和一般的局部搜索算法的调度结果进行了比较，见表 2。

表 2 垂尾部件装配各算法调度对照表

调度形式	迭代次数	最终结果	最小周期/h
Palmer 启发式算法	—	$(\{1\ 3\ 2\}, \{8\ 10\ 6\ 5\}, \{7\ 4\}, \{9\})$	116
优先分配启发式算法	—	$(\{1\ 3\ 2\}, \{10\ 5\ 8\ 6\}, \{7\ 4\}, \{9\})$	98
局部搜索算法	3	$(\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 10\ 6\ 8\}, \{4\ 7\}, \{9\})$	88
HTA-AJSP 算法	10	$(\{1\ 3\ 2\}, \{5\ 6\ 10\ 8\}, \{4\ 7\}, \{9\})$	86

从优化结果上看，采用 Palmer 启发式算法可求得优化解 $C_{\max} = 116h$ ；采用优先分配启发式算法可求得优化解 $C_{\max} = 98h$ ；采用一般的局部搜索算法求得优化解 $C_{\max} = 88h$ 。而本文采用的是 HTA-AJSP 算法，求得优化解 $C_{\max} = 86h$ ，相比而言，优化结果更加理想。从迭代次数比较可以看出，传统局部搜索算法迭代 3 次，便陷入局部最优，而 HTA-AJSP 算法很好地解决了这个问题。

4 结 论

本文提出了一种有效的 HTA-AJSP 算法，并将其用于求解复合材料部件装配调度问题。首先

借助装配工序结构树并采用优先分配启发式算法获得了较优的初始解。由于传统的局部搜索算法容易陷入局部最优，所以本文采用禁忌规则和变邻域搜索方法，对局部搜索算法进行改进，从而克服了这一缺陷。通过对某机型垂尾部件的装配调度实例进行分析验证，并与启发式算法和一般局部搜索算法调度结果进行比较，证实了该算法在复合材料装配调度方面的优越性，对实际生产排程有很好的指导意义。另外，在采用 HTA-AJSP 算法进行优化的过程中发现，当禁忌长度过大时，容易陷入

(下转第 8 页)

成新的总装零件 BOM 表与结构 BOM 表,并将所生成的新表保存在根据订单编号新命名的数据表中。再通过执行 SQL 查询语句根据零件属性生成新的制造 BOM 与采购 BOM。

3 结 论

这种快速配置系统具有很强的针对性、高效性,即只针对这一种系列产品,尤其适合户外高压隔离开关这种在零部件较少改变的情况下,有百余种配置方案的产品。Inventor 提供的 iPart 与 i-Assembly 的参数化建模与装配方式大大提高了这种类型产品的建模效率,其自动生成零部件 BOM 表的功能使其和配置系统很好地关联起来。当产品在 Inventor 的虚拟装配更新时可同时对零件

BOM 表进行及时更新,也方便了对产品配置单的管理。对于基于订单的小批量生产模式来说,提高工作效率就意味着产生了经济效益。

参考文献:

- [1] David W Fowler, Derek Sleeman, Gary Wills, et al. The designers' workbench: using ontologies and constraints for configuration [C]//Proceedings of AI-2004 Conference, Cambridge, UK, December 2004. Cambridge: Springer, 2004: 209-221.
- [2] HIROYAI, SEISHIO, YUIKOO, et al. Effective decision support for product configuration by using CBR[R]. Chiba: Fujitsu Laboratories LTD, 2001.
- [3] 杨煜俊,刘清华,万立,等.基于条件约束满足问题的产品配置研究[J].计算机集成制造系统,2004,10(11):1332-1337.
- [4] 王爱民,肖田元,孟明辰.面向大规模定制的配置设计技术研究[J].计算机集成制造系统,2004,10(11):1326-1331.

The Parametric Model and Rapid Product Configuration of High-voltage Isolation Switch

LI Bo

(Guangzhou Detection and Research Institute of

Special Electron-Machinery Equipment, Guangdong Guangzhou, 511400, China)

Abstract: It designs a technology of parametric modeling and assembly for a series high-voltage isolation switch products with Inventor2008, builds a database of the product configuration combining BOM generation capabilities with SQL Server 2000, develops a rapidly configuration systems using VB6.0. This system can meet the order requirement, generate manufacturing BOM and procurement BOM quickly.

Key words: High-voltage Isolation Switch; Parametric; Product Configuration; BOM

(上接第 4 页)

局部最优,过小会增加计算的复杂度。如何借助于特赦规则等方法权衡好两者之间的关系,还有待作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘善国.先进飞机装配技术及其发展[J].航空制造技术,2006(10):38-41.
- [2] Ugur Ozcan, Bilal Toklu. A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 43(5): 822-829.
- [3] 闫振国,李原,张杰,等.一种飞机装配作业批量排产的图解蚁群算法[J].计算机集成制造系统,2010(7):1437-1443.

- [4] 黄泽森,郭红,唐远新,等.有交货期限的 Job-Shop 工件装配逆序调度算法的研究[J].哈尔滨理工大学学报,1999(10):31-34.
- [5] 金锋赫,孔繁森,金东园.基于设备可用时间约束的装配作业车间调度规则[J].计算机集成制造系统,2008(9):1721-1731.
- [6] Ruiz R, Maroto C. A comprehensive review and evaluation of permutation flow shop heuristics[C]. European Journal of Operational Research, 2005(2): 479-494.
- [7] Hurink J, Knust S. Tabu search algorithms for job-shop problems with a single transport robot[J]. European Journal of Operations Research, 2005(1): 99-111.
- [8] Nowicki E, Smutnicki C. A fast taboo search algorithm for the job shop problem[J]. Management Science, 1996, 42(6): 797-813.

The Algorithm Research on the Assembly Scheduling of Aeronautical Composite Materials

CHEN Zhi-xiang, YE Wen-hua

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to shorten the overall assembly time of aeronautical composite materials components, it establishes a assembly scheduling model, proposes a dispatching algorithm combining heuristic process and taboo search rule together. Based on variable neighborhood search and taboo rule, this algorithm prevents the search process from partial optimum. Comparing the heuristic algorithm with local search algorithm, it applies the algorithm to cases, and proves that the results are quite effective in shortening the assembly cycle and very helpful for the real production scheduling.

Key words: Assembly Scheduling; Object Function; Tabu Search; Cycle