

复合材料自动铺带工艺工时估算及软件开发

钟小丹 陈普会

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要: 基于制造工艺过程的成本模型, 建立复合材料自动铺带工艺工时估算方法, 开发了工时估算软件。根据铺带头的运动规律建立工时估算方程, 并考虑了材料卷盘的更换时间; 采用 Delphi 语言和 SQL Service 数据库管理系统编制工时估算软件, 通过 Visual Basic 语言对 CATIA 进行二次开发, 编制零件工时估算特征提取插件, 提高软件效率。应用软件对某型飞机的平尾多肋式翼盒与多梁式翼盒方案的铺放时间进行分析, 结果表明, 多梁式翼盒由于采用整体化结构设计, 可减轻结构重量, 缩短制造工时, 降低制造成本。

关键词: 复合材料; 自动铺带; 工时估算模型; 铺放效率; 平尾

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)01-0038-05

Process Time Estimation Model for Composite Automated Tape Laying and Its Code Development

Zhong Xiaodan, Chen Puhui

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A process time estimation model is proposed for composite automated tape laying (ATL) on the basis of the manufacturing process-based cost modeling, and the process time estimation software is developed. Time estimating equations for ATL are established based on the motion law of the tape laying head, and the time for changing a tape roll is considered. Then a time estimation code is developed by using software of Delphi and SQL Service, and a part feature extraction plug-in is built using Visual Basic software to improve the efficiency of the developed code based on CATIA secondary development. The ATL lay-up time of two kinds of horizontal stabilizer outboard sections with multiple ribs and multiple spars are estimated by using the developed code. The results indicate that the horizontal stabilizer outboard sections with multiple spars can lighten the structure weight, shorten the process time, and reduce the cost due to the integral structure design concept.

Key words: composite; automated tape laying; time estimation model; lay-up rate; horizontal stabilizer

制造成本评估技术是复合材料控制成本、推广应用的重要手段之一。国外复合材料制造成本的评估方法主要有两大类: 参数法^[1]和基于制造工艺过程的成本模型^[2] (Manufacturing process-based cost model, MPCM)。参数法的典型应用代表如 DAPCA 软件^[3]、PRICE-H 软件^[4], 使用之前均须通过类似产品的历史数据进行参数修正, 而且难以反映产品形状以及工艺变化导致的成本差异。

MPCM 法是一种自下而上的成本估算方法, 将生产阶段各种成本与构件的设计特征、材料、工艺方法相关联而建立的成本估算模型。这种方法的基础是根据具体工艺过程建立的构件尺寸和复杂性标定定律, 即工时估算方法。MPCM 能快速适应工艺条件的变化, 对产品的历史数据需求较少。复合材料制造成本估算软件如 ACCEM 手册^[5]、COSTADE 软件^[6]的估算方法均采用 MPCM 法。

国内针对复合材料制造成本进行估算采用的方法主要为 MPCM 法,如刘玲等人^[7]对热压釜成形工艺工时进行分析建模;叶金蕊等人^[8]建立了波纹梁热压釜成形的工时估算理论,并进行参数修正以适应结构形状等对工艺工时的影响;叶强等人^[9]对手工铺放、VARI 等工艺进行分析建模,开发出相应软件,并对某型飞机副翼的复合材料及金属选材方案进行成本比较分析。

典型自动铺带机包括平面型与曲面型自动铺带机^[10],适用于飞机的翼面和壁板结构加工,铺放零件一般为平板、小曲率壁板及单曲面中曲率机身壁板。自动铺带工艺在国外已广泛应用于航空复合材料制造行业中,而国内自主研发及引进的自动铺带设备也已进入工程应用阶段^[11],研究自动铺带工艺的成本评估方法,使设计人员能够对其设计方案进行制造成本与重量(性能)权衡,具有重要意义。

本文针对矩形平板铺放时间进行分析,建立自动铺带工艺的工时估算模型;对不同尺寸的平板零件铺放效率进行分析,并对某型飞机平尾的两种构型方案进行铺放工时比较分析。

1 自动铺带工艺工时估算方法

对于长为 l 的预浸带,自动铺带机的典型铺放过程如图 1 所示,铺带头以恒定的加速度 a 加速至 v ,匀速铺放一段距离后减速停止,对预浸带进行 0° 切割,铺带头再将剩余带长 l_0 铺放完成。距离 l_0 由铺带机设备的具体参数决定,其对铺放时间的影响较小,可忽略不计。故此时,铺放时间可近似为铺带头从加速、匀速、减速到停止的过程,计算公式如下

$$t_l = (l - 2 \times v^2/a/2)/v + 2 \times v/a + t_{\text{delay}} \quad (1)$$

式中: t_{delay} 为延迟时间,包含铺带头升降、切割、调转方向及定位等操作的时间。

式(1)可化简为

$$t_l = l/v + v/a + t_{\text{delay}} \quad (2)$$

面积为 A 的矩形平板零件,其长为 L_{part} ,宽为 W_{part} ,采用 W_t 带宽的预浸带共铺放 N_{ply} 层。若第 i 层预浸带与长度方向呈 θ 角铺放,如图 2 所示,铺带头完成该层预浸带铺放的时间为 t_θ^i ,所需预浸带的长度为 L_θ^i ,铺放次数为 n_θ^i ,分别由以下公式计算得到

$$L_\theta^i = A/W_t \quad (3)$$

$$n_\theta^i = (L_{\text{part}} \sin\theta + W_{\text{part}} \cos\theta)/W_t \quad (4)$$

$$t_\theta^i = L_\theta^i/v + n_\theta^i \cdot (v/a + t_{\text{delay}}) \quad (5)$$

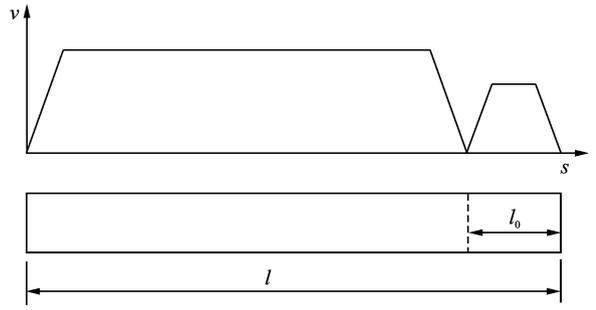


图 1 预浸带铺放示意

式中:上标 i 表示零件的第 i 层,下标 θ 表示该层预浸带的铺层角,在自动铺带工艺的铺层角通常包含 0° , $\pm 45^\circ$ 和 90° 。

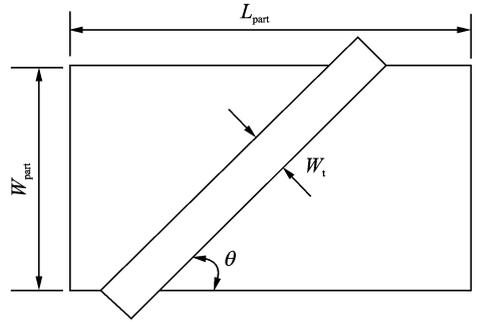


图 2 矩形平板零件铺放示意

若零件形状不规整或为曲板,则取零件的 0° 层铺放长度 L_0 , 90° 层铺放长度 W_{90} ,式(4)可改写为

$$n_\theta^i = (L_0 \sin\theta + W_{90} \cos\theta)/W_t \quad (6)$$

完成零件铺放的总工时为

$$t_{\text{part}} = t_{\text{setup}} + t_{\text{matload}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ply}}} t_\theta^i \quad (7)$$

式中: t_{setup} 为设备、模具及材料的准备时间; t_{matload} 为供料卷盘更换时间,与更换材料的重量有关,可由以下公式计算

$$t_{\text{matload}} = M_{\text{part}} \cdot t_{\text{rc}} \quad (8)$$

式中: M_{part} 为零件毛坯重量; t_{rc} 为单位重量供料卷盘的更换时间。

随着自动铺带技术的广泛应用,自动铺带机装备技术也日益完善,欧美已开发出可实现两步法铺放和多铺带头铺放的自动铺带机。采用两步法铺放时,供料卷盘中的预浸带已裁剪好,则式(5)中的延迟时间不含预浸带切割时间;对于具有 N_{head} 个铺带头的设备,式(5)可改写为

$$t_\theta^i = L_\theta^i / (N_{\text{head}} \cdot v) + n_\theta^i \cdot (v/a + t_{\text{delay}}) \quad (9)$$

为提高铺放效率,小零件铺放时,可同时铺放多个零件,完成后再根据单个零件尺寸进行裁剪,此时,式(4)可改写为

$$n_{\theta}^i = \frac{L_{\text{part}} \sin\theta + N_{\text{part/run}} \cdot W_{\text{part}} \cos\theta}{N_{\text{part/run}} \cdot W_t} \quad (10)$$

式中 $N_{\text{part/run}}$ 为设备批量加工的零件数量。

2 自动铺带工时估算的软件实现

自动铺带工时估算软件使用可视化应用程序开发工具 Delphi 在客户端开发用户界面、工时估算和数据库管理模块;利用 SQL Service 数据库管理系统在服务器端建立工时估算数据库;同时采用 Visual Basic 语言开发 CATIA 插件,用于提取估算过程中所需要的零件特征信息。软件的操作流程如图 3 所示。

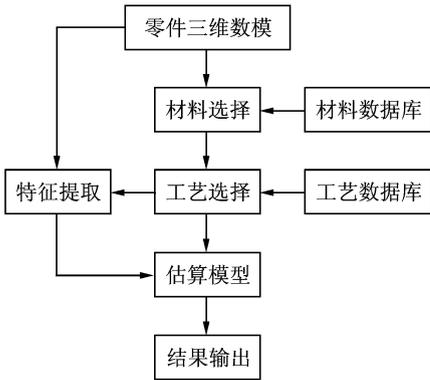


图 3 工时估算流程

2.1 软件数据库

软件数据库包括材料数据库和工艺数据库。材料数据库用于存储材料的基本信息,包括预浸料牌号、带宽、厚度和密度等信息;工艺数据库则存储与工艺相关的信息,包括各工艺具体工步的计算参数、使用的设备名称、涉及的零件特征尺寸和工时估算函数代码等信息。数据库的逻辑关系见图 4,其中 pk 表示关键字, fki 表示第 i 个外键。

2.2 CATIA 插件开发

软件进行工时估算时,需要提取零件的相关设计特征。零件的三维数模多为 CATIA 软件绘制,因此本文针对 CATIA 软件进行二次开发,编写特征提取插件,提高软件使用效率。采用 Automation 技术^[12]对 CATIA 进行二次开发,具体开发的数据结构见图 5。通过开发的插件,对零件 CATIA 对象和属性进行暴露,获取工时估算所需要的特征尺寸数据。

3 软件分析应用

自动铺带机参数参考文献^[13],其中铺放速度为 0.51 m/s,加速度为 1 m/s²,延迟时间为 70 s。以平板为例对自动铺带的效率进行分析,并对采用自

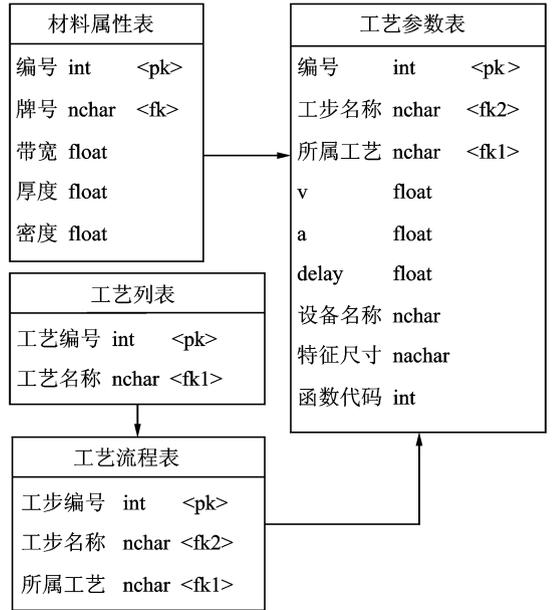


图 4 数据库的逻辑模型图

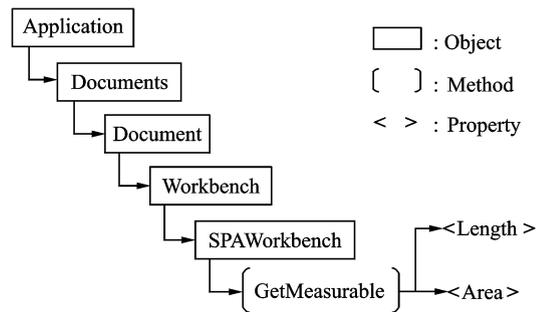


图 5 CATIA 二次开发数据结构

动铺带工艺的平尾外伸段翼盒铺放工时进行估算。

3.1 自动铺带效率分析

矩形平板零件铺层为 $[45/-45/0/45/0/-45/90/0]$,长(0° 层方向)为 6 m 和 1 m,分别采用 150 mm 和 300 mm 两种宽度预浸带进行铺放。零件信息输入界面见图 6,自动铺带的铺放效率随零件宽度变化而变化,如图 7 所示。

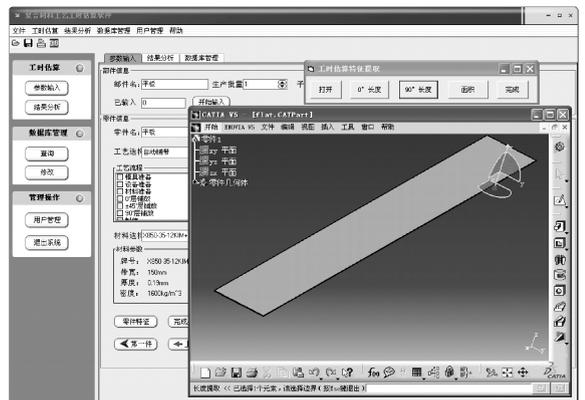


图 6 零件信息输入

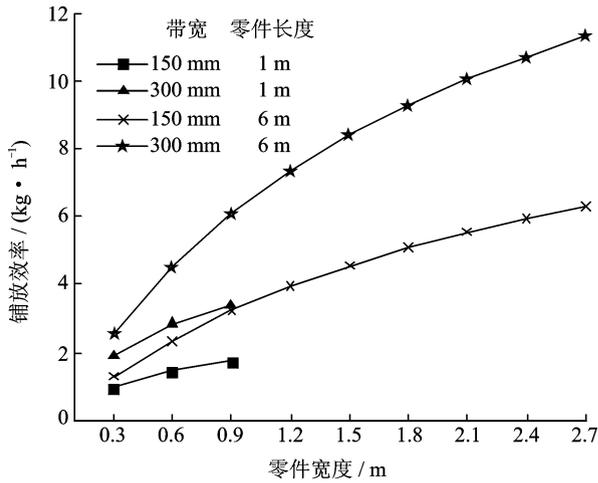


图 7 不同带宽及零件尺寸的 ATL 铺放效率对比

由图 7 可知,自动铺带的铺放效率随着使用的预浸带带宽增大而提高,且随着铺放零件的尺寸增大而提高。这主要是由于自动铺带工艺的工序间转化速率较慢^[14],即工艺过程中的延迟时间较长。图 8 进一步说明了这个问题。图 8 反映了长 6 m、宽 0.3 m 的零件铺放工时与批量加工零件数的关系。从图中可看出,零件的铺放时间随着零件批量加工的数量增大而减小,并逐渐趋于稳定;采用的预浸带带宽越窄,时间减少得越多。

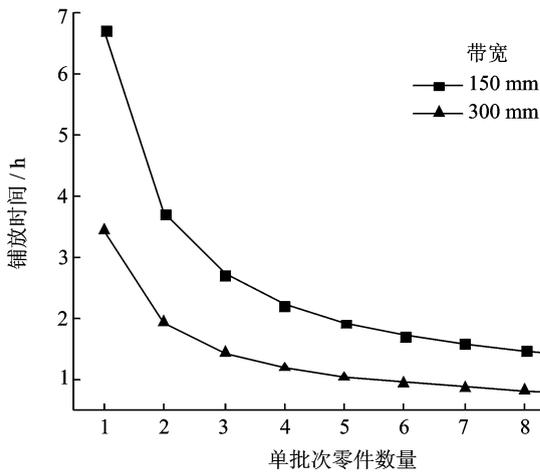
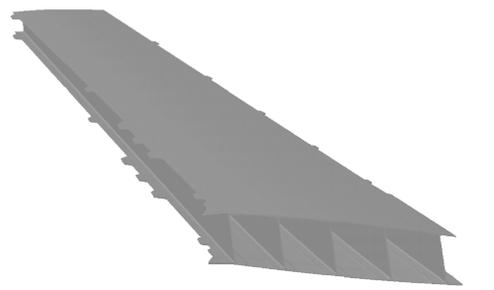


图 8 零件铺放时间-批量加工零件数曲线

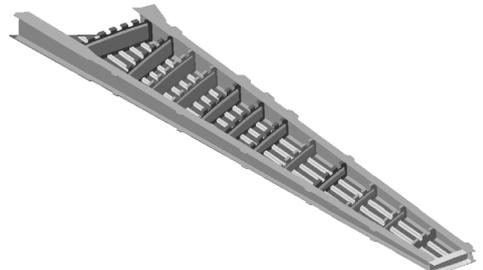
3.2 平尾外伸段翼盒工艺时间分析

已知某型飞机的复合材料平尾方案为外伸段翼盒与中央翼盒机械装配,其外伸段翼盒有两种备选方案,见图 9。方案 A 中外伸段翼盒由上下蒙皮与翼梁共固化成形;方案 B 中外伸段翼盒由上下蒙皮壁板、翼梁和翼肋机械装配而成,其中蒙皮壁板由蒙皮与工字型加强筋条共固化成形。两种方案中的所有零件采用 ATL 铺放后裁剪,使用的预浸带带宽为 150 mm,1 架次生产时的铺放时间估算

结果见图 10。



(a) 方案A多梁式



(b) 方案B多肋式

图 9 平尾外伸段翼盒构型方案

| 编号 | 零件名称 | 铺放位置 | 零件数量 | 一次加工量 | 工序名称 | 预计时间 |
|----|------------|------|------|-------|--------------------------|------|
| 1 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 4.54h 3000-35-120M4-190 | |
| 2 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 3.24h 3000-35-120M4-190 | |
| 3 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 22.92h 3000-35-120M4-190 | |
| 4 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.28h 3000-35-120M4-190 | |
| 5 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 31.25h 3000-35-120M4-190 | |
| 6 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 4.71h 3000-35-120M4-190 | |
| 7 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 2.23h 3000-35-120M4-190 | |
| 8 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 22.47h 3000-35-120M4-190 | |
| 9 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.43h 3000-35-120M4-190 | |
| 10 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 31.67h 3000-35-120M4-190 | |
| 11 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 6.74h 3000-35-120M4-190 | |
| 12 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 1.58h 3000-35-120M4-190 | |
| 13 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 2.91h 3000-35-120M4-190 | |
| 14 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 0.91h 3000-35-120M4-190 | |
| 15 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 6.21h 3000-35-120M4-190 | |
| 16 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 1.22h 3000-35-120M4-190 | |
| 17 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 2.42h 3000-35-120M4-190 | |
| 18 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 2.83h 3000-35-120M4-190 | |
| 19 | 平尾外伸段翼盒壁板A | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 6.57h 3000-35-120M4-190 | |

(a) 方案A

| 编号 | 零件名称 | 铺放位置 | 零件数量 | 一次加工量 | 工序名称 | 预计时间 |
|----|------------|------|------|--------|--------------------------|------|
| 1 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 4.14h 3000-35-120M4-190 | |
| 2 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.82h 3000-35-120M4-190 | |
| 3 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 22.92h 3000-35-120M4-190 | |
| 4 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.21h 3000-35-120M4-190 | |
| 5 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 上蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 29.96h 3000-35-120M4-190 | |
| 6 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 4.66h 3000-35-120M4-190 | |
| 7 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.82h 3000-35-120M4-190 | |
| 8 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 22.57h 3000-35-120M4-190 | |
| 9 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 1.91h 3000-35-120M4-190 | |
| 10 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 下蒙皮 | 2 | 1 层蒙皮 | 29.62h 3000-35-120M4-190 | |
| 11 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 24 | 24 层蒙皮 | 1.42h 3000-35-120M4-190 | |
| 12 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 24 | 24 层蒙皮 | 1.92h 3000-35-120M4-190 | |
| 13 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 24 | 24 层蒙皮 | 3.56h 3000-35-120M4-190 | |
| 14 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 24 | 24 层蒙皮 | 3.86h 3000-35-120M4-190 | |
| 15 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 24 | 24 层蒙皮 | 7.27h 3000-35-120M4-190 | |
| 16 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 8.57h 3000-35-120M4-190 | |
| 17 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 8.91h 3000-35-120M4-190 | |
| 18 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 4.94h 3000-35-120M4-190 | |
| 19 | 平尾外伸段翼盒壁板B | 1 筋梁 | 2 | 2 层蒙皮 | 8.55h 3000-35-120M4-190 | |

(b) 方案B

图 10 平尾外伸段翼盒铺放时间估算结果

两种构型方案中各子零件的铺放时间比较见图 11。与方案 B 相比,方案 A 其蒙皮重量稍重,铺放时间增加了 3.9 h;翼梁数目增加了 6 根,铺放时

间增加了 8.3 h;但其采用整体化结构设计思路,没有翼肋和筋条,减少了这些零件的铺放时间。

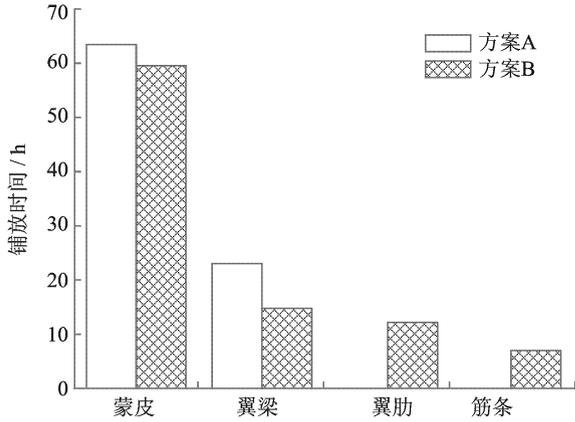


图 11 外伸段翼盒铺放时间比较

方案 A、方案 B 的重量和铺放时间见表 1。从表中可看出,方案 A 的零件数减少了 32 个,重量减轻了 20 kg,紧固件数减少了 2 200 个,铺放时间减少了 7.4 h;同时由于零件数量减少,其固化时间与装配时间也将显著缩减。因此采用方案 A 的平尾外伸段翼盒构型可减少制造工时,降低成本。

表 1 平尾外伸段翼盒构型方案比较

| 方案 | 质量/kg | 零件数 | 紧固件数 | 铺放时间/h |
|----|-------|-----|-------|--------|
| A | 260 | 2 | 0 | 86.1 |
| B | 280 | 34 | 2 200 | 93.5 |

4 结 论

(1)采用基于工艺制造模型建立了复合材料自动铺带工艺铺放时间估算模型,并开发相应软件,同时编制 CATIA 特征提取插件,提高软件运行效率;

(2)对平板零件的自动铺带效率分析,结果表明,零件铺放时采用的预浸带带宽增大以及产品批量的增加,可提高自动铺带工艺的铺放效率;

(3)平尾构型方案工时估算分析表明,与多肋式翼盒结构相比,多梁式翼盒结构采用整体化结构设计,结构重量更轻,并可有效减少制造工时,降低成本。

参考文献:

[1] Watson R, Kwak Y H. Parametric estimating in the knowledge age: Capitalizing on technological advances[C]//IAMOT 2004 13th International Conference on Management of Technology. Washington, DC:[s. n.],2004:1-11.

[2] Gutowski T G, Hoult D, Dillon G, et al. Development of a theoretical cost model for advanced composite fabrication [J]. Composites Manufacturing, 1994,5(4):231-239.

[3] Hess R W, Romanoff H P. Aircraft airframe cost estimating relationships. Study approach and conclusions[R]. RAND/R-3255-AF, 1987.

[4] PRICE Corp. PRICE H fundamentals course material [M]. New Jersey: Price Systems L L C, 2004:7-36.

[5] Leblanc D J, Kokawa A, Bettner T, et al. Advanced composite cost estimating manual [R]. California: Northrop Corporation, AFFDL-TR-76-87, 1976.

[6] Ilcewicz L B, Mabson G E, Metschan S L, et al. Cost optimization software for transport aircraft design evaluation (COSTADE)-cost design methods [R]. NASA CR-4737, 1996.

[7] 刘玲,张博明,王殿富,等.热压釜成型工艺工时估算的理论模型[J].复合材料学报,2004,21(3):146-150.

Liu Ling, Zhang Boming, Wang Dianfu, et al. Theoretical estimation model of man hour for autoclave molding process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004,21(3):146-150.

[8] 叶金蕊,张博明.热压釜成型复合材料波纹梁工艺工时估算[J].复合材料学报,2009,26(1):65-73.

Ye Jinrui, Zhang Boming. Processing time estimation model for the autoclave manufacturing of composite waved beam [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009,26(1):65-73.

[9] 叶强,陈普会,柴亚楠.复合材料结构制造成本估算模型与软件开发[J].复合材料学报,2008,25(4):161-167.

Ye Qiang, Chen Puhui, Chai Yanan. Cost modeling for composite structure fabrication and its code development[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4):161-167.

[10] Grimshaw M N, Grant C G, Diza J M L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures[C]//46th International SAMPE Symposium. Long beach, CA: [s. n.], 2001:2484-2494.

[11] 肖军,李勇,文立伟,等.树脂基复合材料自动铺放技术进展[J].中国材料进展,2009,28(6):28-32.

Xiao Jun, Li Yong, Wen Liwei, et al. Progress of automated placement technology for polymer composites[J]. Materials China, 2009,28(6):28-32.

[12] 胡挺,吴立军.CATIA 二次开发技术基础[M].北京:电子工业出版社,2006.

Hu Ting, Wu Lijun. Technical basis for CATIA secondary development[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2006.

[13] Willden K S, Harris C G, Flynn B W, et al. Advanced technology composite fuselage manufacturing [R]. NASA CR-4735, 1997.

[14] Gutowski T G. Advanced composite manufacturing [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1997.

