

# 基于不同定位基准的复合材料护板容差分析研究

刘彦汝,周 大,杨 超,冯绍红,周欣康,谢 辉

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司复合材料加工厂,成都 610092)

**[摘要]** 先进复合材料以比重小、强度高、疲劳性能好等优点在现代飞机中得到广泛的应用,复合材料零件热成型过程中的变形和厚度控制困难,部件定位方式和容差分配的合理性在很大程度上影响着飞机部件装配的质量和效率。以某复合材料护板装配为例,研究采用两种不同的数控铣边定位方案对部件容差分配及装配协调的影响,并使用 MATLAB 软件编程计算模拟各制造公差与最终装配容差之间的数学关系,为该部件数控铣边的定位方式和铣夹设计提供依据。

**关键词:** 飞机装配;复合材料部件;容差分配;正态分布;定位方式

## Research on Tolerance Analysis of Composite Shield Based on Different Positioning References

LIU Yanru, ZHOU Da, YANG Chao, FENG Shaohong, ZHOU Xinkang, XIE Hui

(Composites Processing Plant, AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) CO.,LTD., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** Advanced composite materials are widely used in modern aircraft due to their small specific gravity, high strength and good fatigue performance. The deformation and thickness control of composite parts during thermoforming is difficult, and the rationality of component positioning and tolerance distribution greatly affects the quality and efficiency of aircraft component assembly. In this paper, a composite material shield assembly is taken as an example to study the effect of two different CNC milling edge positioning schemes on the tolerance distribution in the whole assembly process, and use MATLAB software to calculate and simulate the simulation tolerance between each manufacturing tolerance and the final assembly tolerance. The mathematical relationship provides a basis for the positioning of the CNC milling edge and the design of the frame.

**Keywords:** Aircraft assembly; Composite parts; Tolerance distribution; Normal distribution; Targeting

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.18.091

先进复合材料(Advanced composite materials, ACM)主要指高性能纤维(如碳纤维、碳纤维和芳纶)等增强的树脂基复合材料<sup>[1-2]</sup>,随着材料工艺的成熟及产品质量的提高,高性能复合材料在航空航天领域的使用比例大幅度提升<sup>[3-4]</sup>,以其耐高温、耐疲劳、阻尼减震性好、破损安全性好、性能可设计等优势<sup>[5-6]</sup>,在现代飞行器小翼面部件(鸭翼、垂尾、方向舵、内侧副翼、外侧副翼、襟翼、腹鳍等)和舱门类部件(舱门、护板等)上取得重要应用。复合材料零件热成型过程中的变形和厚度控制困难,部件定位方式和容差分配的合理性在很大程度上影响着飞机部件装配质量和效率<sup>[7-8]</sup>。

国内外学者在航空装配、容差分析方面进行了多样化的深入研究。Hillyard 利用计算机辅助软件对飞机制造过程中的容差分配进行了设计和优化<sup>[9]</sup>;吕瑞强<sup>[7]</sup>、

王新<sup>[10]</sup>等借助软件建立三维容差分析模型,对飞机部件装配的误差累计、容差分配、工艺流程进行研究;檀甜甜等<sup>[11]</sup>从容差建模、容差设计、容差分析、容差优化 4 个方面,介绍了容差分配技术在国内外航空航天领域的研究、实践和应用情况;王学刚等<sup>[12]</sup>采用极限法分析多项环节误差,提出了协调孔及测量销工艺容差分配方法;赵建国等<sup>[13]</sup>介绍了面向飞机数字化装配的测量基准标定、测量设备协同工作模式等方法;李玉山<sup>[14]</sup>、栾新慧等<sup>[15]</sup>结合 A380 复材翼肋、车门偏差关系模型、自动装配线等具体案例,提出针对具体模型的优化装配及智能监测方法。

本文结合某复合材料护板(以下简称“护板”)的实际制造状态,研究采用两种不同的数控铣切定位方式对该部件整个制造过程中容差分配的影响,使用

MATLAB 软件编程计算模拟各制造公差独立状态下最终装配容差的分布式,为该部件数控铣切的定位方式、工序设置、夹具设计和外形检测提供依据。

## 1 某复合材料护板制造过程误差积累

### 1.1 复合材料护板制造过程简介

本文选用的复合材料护板主要由树脂基碳纤维复合材料内蒙皮、树脂基碳纤维复合材料外蒙皮、泡沫夹芯和 3 个金属接头组成,如图 1 所示。该复材护板采用手工铺叠、阳模成型的方式成型,即先在成型模具上以手工铺叠的方式铺叠外蒙皮,再铺叠外蒙皮与夹芯之间的胶膜,然后依照激光投影仪的投影线或定位工装定位夹芯,再铺叠夹芯与外蒙皮之间的胶膜,最后铺叠内蒙皮。铺叠内蒙皮的过程中,受到手工铺叠作业不规则压力的作用,夹芯易在 XY 平面滑移。铺叠完成后,将护板抽真空后连同模具送入热压罐固化。固化成型后,数控铣切去除外蒙皮边的余量。最后在装配工序中安装 3 个金属接头,将复材护板安装到机身上。

护板类部件与机身协调和配合要求高,以本文的护板部件为例,护板的 4 条边与机身存在对缝配合关系,采用数控铣切蒙皮 4 条边外形余量的工序,护板的定位方式及定位基准均对后续交点接头安装、装机后对缝间隙有直接影响,进而影响飞机的表面质量及隐身等性能。

### 1.2 护板制造过程中的制造公差

护板安装在机身上的间隙设为  $\Delta$ ,在护板未装机之前, $\Delta$  无法被测量,故在制造过程中引入一个工艺参数,即护板相对于理论数模的相对间隙公差,设为  $T$ 。

对于采用手工铺叠、阳模成型的制造方式制造该护板,每个制造环节都存在公差,其参数设为  $\mu$ 。

(1) 外蒙皮的厚度公差为  $\mu_1$ 。当外蒙皮厚度为 1.5mm,厚度公差允许值为零件厚度的 5% 时  $\mu_1 = \pm 0.075\text{mm}$ ; (2) 胶膜单层厚度公差为  $\mu_2$ , 设:  $\mu_2 = 0.2 \pm 0.05\text{mm}$ ; (3) 夹芯边缘轮廓数控铣切外形公差为  $\mu_3$ , 设:  $\mu_3 = \pm 0.2\text{mm}$ ; (4) 夹芯数控铣切厚度公差为  $\mu_4$ , 按航标 HB5800—1999:  $\mu_4 = \pm 0.26\text{mm}$ ; (5) 内蒙皮的厚度公差为  $\mu_5$ , 当内蒙皮厚度为 1.5mm, 厚度公差允许值为零件厚度的 5% 时  $\mu_5 = \pm 0.075\text{mm}$ ; (6) 按照型架制工艺耳片, 孔位偏差为  $\mu_6$ , 设:  $\mu_6 = \pm 0.02\text{mm}$ ; (7) 按照激光投影仪铺叠夹芯, 铺叠定位位置公差为  $\mu_7$ , 设:  $\mu_7 = \pm 1\text{mm}$ ; (8) 数控铣切复材零件外轮廓的外形公差为  $\mu_8$ , 设:  $\mu_8 = \pm 0.2\text{mm}$ 。

## 2 容差分配

### 2.1 护板主体区域的厚度公差

复材护板主体区域指如图 1 所示的 Z 方向上包含

内蒙皮、外蒙皮和夹芯的区域,设该区域制造过程中厚度公差  $T_1$ ,包含内蒙皮、外蒙皮、夹芯和上下各一层胶膜的公差积累:

$$T_1 = \mu_1 + 2\mu_2 + \mu_4 + \mu_5$$

若零件尺寸在公差范围呈现均匀分布,设总公差为  $T_1$ ,代入数据得:

$$T_1 = (0.4 \pm 0.51) \text{mm}$$

若零件尺寸在公差范围呈现正态分布,设某公差  $Y = T_1 \pm \alpha$ ,若该公差满足  $Y \sim N(\mu, \sigma^2)$  正态分布,根据正态分布的“ $3\sigma$ ”原则,  $\sigma = \alpha/3$ 。若  $\mu_1, \mu_2, \mu_4, \mu_5$  均满足正态分布,使用 MATLAB 编程模拟计算总公差  $T_1$  的值,样本容量为 10000,即进行 10000 次随机取值计算,每一项独立公差都在概率上满足正态分布。得到最终厚度公差频率分布直方图如图 2 所示,拟合得到公差的正态分布式和最终公差表达式为:

$$T_1 \sim N(0.4, 0.0963^2)$$

$$T_1 = (0.4 \pm 0.2888) \text{mm}$$

生产实践数据表明,使用正态分布来评估制造装配误差比均匀分布更具准确性。下文的计算中,如无特别说明,设独立公差参数  $\mu$  均服从正态分布。无论后续采用蒙皮工艺耳片定位方案还是内型面凸缘定位方案,该厚度公差主要影响护板装机后护板外蒙皮与机身外蒙皮之间对缝的阶差,因为该阶差可以通过动力拉杆进行调节,故本文不作深入探讨。

### 2.2 蒙皮工艺耳片定位方案的外形容差分析

蒙皮工艺耳片定位方案是一种优先保证外蒙皮绝对位置准确性的定位方案。具体装配方案是在铺叠外蒙皮时,在零件边缘留有足够的余量,并在外蒙皮余量上保留工艺耳片,如图 3 所示。通过成型模具上的制孔工装,在工艺耳片上制出定位孔。数控加工时,以工艺耳片上的定位孔进行定位,铣切余量。然后再切除工艺耳片。在装配型架上装配 3 个金属接头时,因为外蒙皮

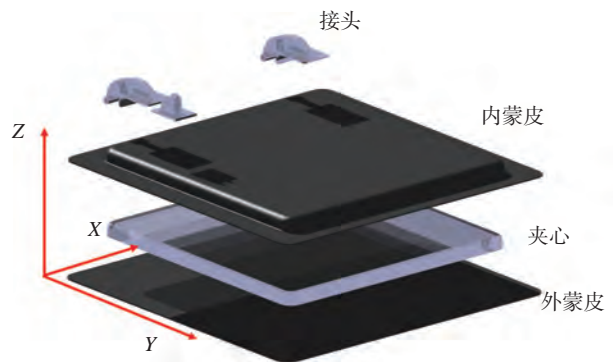


图1 复合材料护板结构示意图

Fig.1 Composite material shield structure diagram

边缘位置准确性高,故以外蒙皮两条外形边(如图3蓝色直线所示)为基准进行净边定位。故两条定位边的相对余量为0。设另外两条外形边的余量公差为 $T_2$ , $T_2$ 取该外形边处公差的最大值 $T_2=2\mu_8$ 。

各独立公差满足正态分布,代入数据,使用MATLAB编程模拟计算,得到 $T_2$ 服从正态分布的公差表达式为 $T_2=\pm 0.2820\text{mm}$ 。

设 $A_1$ 、 $A_2$ 等4条内型面边公差为 $T_3$ :

$$T_3=\mu_2+\mu_3+\mu_5+\mu_6+\mu_7$$

各独立公差满足正态分布,代入数据,使用MATLAB编程模拟计算,得到 $T_3$ 服从正态分布的公差表达式,计算10次取平均值,得到 $T_3=(0.2\pm 1.0189)\text{mm}$ 。

如图3所示,内型面凸缘面 $B_1$ 、 $B_2$ 处公差为 $T_3=(0.2\pm 1.0189)\text{mm}$ ,该部位是金属接头装配的重要安装面、重要承力面,若此处制造公差过大,无论是打磨金属接头还是加垫,均极易超出设计条件允许范围,故不建议采用工艺耳片定位的数控铣边方案。

### 2.3 内型面凸缘定位方案的外形公差分析

内型面凸缘定位方案是一种优先保证内型面金属接头安装面准确性的定位方案。具体装配方案是定制专用数控铣切夹具,以复材护板内型面安装金属接头位置的两个凸缘面,如图4所示, $A_1$ 、 $A_2$ 两个凸缘面为定位面。数控铣切后,装配3个金属接头工序中同样以如图4中 $A_1$ 、 $A_2$ 两个凸缘面为定位面,数控铣切和金属接头装配的定位基准保持一致。故 $A_1$ 、 $A_2$ 两个凸缘面相对余量为0,4条外形边余量公差 $T_4$ 等于数控铣切复材零件外轮廓的外形公差 $\mu_8$ ,即:

$$T_4=\mu_8$$

代入数据得:

$$T_4=\pm 0.2\text{mm}$$

设 $A_3$ 、 $A_4$ 两个凸缘面的外形公差为 $T_5$ , $T_5$ 取该外形边处公差的最大值:

$$T_5=2\mu_2+2\mu_3+2\mu_5$$

各独立公差满足正态分布,代入数据,使用MATLAB编程模拟计算,得到 $T_5$ 服从正态分布的公差表达式为:

$$T_5=(0.4\pm 0.3114)\text{mm}$$

若采用该定位方式,可以避免按照激光投影仪铺叠夹芯的铺叠定位误差 $\mu_7$ 对复材护板 $xy$ 平面装配误差产生的影响,安装金属接头时不需要打磨或加垫,且其余各外形边的误差也均能达到装机要求。

复材护板类部件的胶接成形、数控铣边、接头安装等工序都必须保证护板装机过程中两个最重要的装配要素:护板外蒙皮边缘与机身口框配合的对缝间隙及阶差;护板金属接头与机身铰链连接处的配合面及同轴度

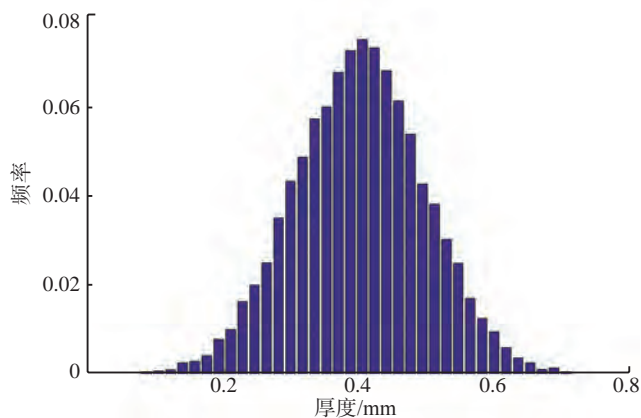


图2 复合材料护板夹心区域胶接成形厚度公差模拟计算频率分布直方图

Fig.2 Composite material shield sandwich area bonding forming thickness tolerance simulation calculation frequency distribution histogram

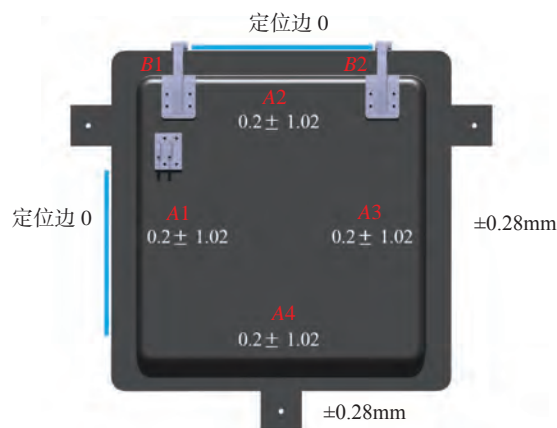


图3 复合材料护板工艺耳片定位方案外形公差图

Fig.3 Composite material shield technology ear positioning scheme shape tolerance diagram

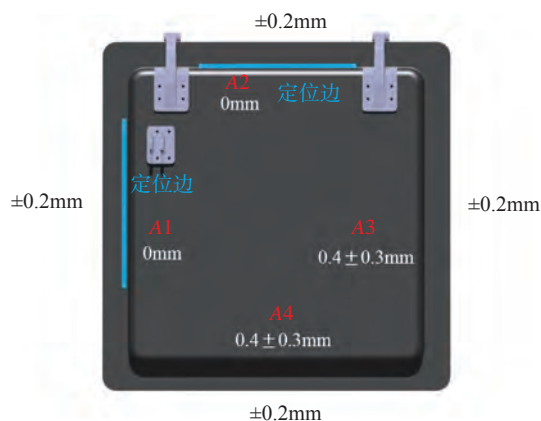


图4 复合材料护板内型面凸缘定位方案外形公差图

Fig.4 Composite material shield inner profile flange positioning scheme shape tolerance diagram

公差。采用数控铣边后,因为数控铣切的高精度(现代数铣已经能将 $\mu_8$ 控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内),第1个要素可以依靠数控铣边来保证,第2个要素则要通过合理的容差分配,调整定位及装配方案,保证各项制造误差在设计允许范围之内。

综上所述,本文分析研究了两种不同的数控铣切定位方案对复材护板容差分配及装配协调的影响,得到两种方案在各制造公差独立状态下的最终装配容差分布式,通过对比论证,内型面凸缘定位方案充分利用了数控铣边的高精度来保证装机后的对缝间隙公差,又合理、高效地保证了金属接头的安装精度,比蒙皮工艺耳片定位方案的容差分配更合理。

### 3 结论

本文研究两种不同的数控铣切定位方案对复合材料护板容差分配及协调的影响,使用MATLAB软件编程计算模拟各制造公差独立状态下最终装配容差的分布式,证明内型面凸缘定位方案比蒙皮工艺耳片定位方案更合理,并为数控铣切的详细定位方式和铣夹设计提供依据。

### 参考文献

[1] 师昌绪. 材料大辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.  
SHI Changxu. Materials comprehensive dictionary[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994.

[2] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 中国学术期刊文摘, 2008(18): 5.  
DU Shanyi, GUAN Zhidong. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China[J]. Chinese Science Abstracts, 2008(18): 5.

[3] 王华. 飞机先进复合材料结构装配协调技术研究现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 26-33.  
WANG Hua. Advanced composite part assembly: a survey of methodologies and practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 26-33.

[4] 马保全, 周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1787-1803.  
MA Baoquan, ZHOU Zhenggan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries[J]. Acta Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 1787-1803.

[5] MAIR R I. Advanced composite structures research in Australia[J]. Composite Structures, 2002, 57(1): 3-10.

[6] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.

DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[7] 吕瑞强, 侯志霞, 王明阳. 基于3DCS的飞机翼盒容差分配方案优化方法研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 68-71, 83.  
LÜ Ruiqiang, HOU Zhixia, WANG Mingyang. Research on tolerance allocation plan optimization for aircraft wing box based on 3DCS[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 68-71, 83.

[8] 梁宪珠, 常海峰, 薛向晨, 等. 结构形式及成型方案对飞机复材结构的外形精度影响分析[J]. 航空制造技术, 2012, 55(3): 74-77.  
LIANG Xianzhu, CHANG Haifeng, XUE Xiangchen, et al. Analysis of influence of structural type and forming scheme on shape precision of aircraft composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(3): 74-77.

[9] HILLYAD R C. Dimensions and tolerances in shape design[D]. England: Cambridge University, 1978.

[10] 王新, 张毅, 赵锐霞. 无余量装配技术在复合材料机身结构部段上的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 106-109.  
WANG Xin, ZHANG Yi, ZHAO Ruixia. Application of net assembly technology on aircraft composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 106-109.

[11] 檀甜甜, 王贺, 侯东旭, 等. 容差分配技术在运载火箭壳体铆接装配中的应用分析[J]. 质量与可靠性, 2018(2): 45-48.  
TAN Tiantian, WANG He, HOU Dongxu, et al. Application of tolerance distribution technology to riveting assembly of launch vehicle shell segment [J]. Quality and Reliability, 2018(2): 45-48.

[12] 王学刚, 李扬, 郝丁, 等. 基于数字量协调技术的航天产品工艺容差应用研究[J]. 航天制造技术, 2017(3): 25-28.  
WANG Xuegang, LI Yang, HAO Ding, et al. Application research on aerospace product process tolerance based on digital coordination technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(3): 25-28.

[13] 赵建国, 邓春利, 郭洪杰, 等. 飞机装配协同测量技术应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(13): 59-62, 73.  
ZHAO Jianguo, DENG Chunli, GUO Hongjie, et al. Application on cooperative measure technology for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(13): 59-62, 73.

[14] 李玉山, 姜开宇. 基于在线仿真技术的自动装配线工作过程智能监测[J]. 模具工业, 2018, 44(2): 1-5, 14.  
LI Yushan, JIANG Kaiyu. Intelligent monitoring of automatic assembly line based on online simulation technology[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(2): 1-5, 14.

[15] 栾新慧, 刘惠国, 刘银华. 基于装配工艺仿真的车门公差分配优化方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(2): 12-15.  
LUAN Xinhui, LIU Huiguo, LIU Yinhua. Research on optimization method of car door tolerance allocation based on assembly process simulation[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(2): 12-15.

通讯作者: 刘彦汝, 部装工艺师, 主要研究方向为复合材料部件装配技术、火焰喷铝自动化技术, E-mail: 1607715480@qq.com。

(责编 大漠)