

## 机翼翼盒装配间隙精密补偿研究\*

## Research on Active Compensation for Assembly Gap of Aircraft Wing Box

中航工业北京航空制造工程研究所 黄春 李光丽 袁士平 肖庆东 卜泳

[摘要] 在机翼翼盒的装配中多采用被动补偿的方式消除壁板和骨架的装配间隙,装配间隙难于精确测量且补偿工艺复杂,由此开展机翼翼盒装配间隙精密补偿方法的工艺性研究,通过对精密补偿技术中配合面精确测量和补偿余量精加工去除工艺等关键技术分析,可实现机翼翼盒骨架与壁板的精密补偿无间隙装配,从而提高飞机机翼翼盒的整体装配水平。

关键词:精密补偿 间隙测量 余量去除

[ABSTRACT] Passive compensation is mainly used in the assembly of wing box, which is helpful to eliminate the assembly gap between the panel and skeleton. But, to measure the assembly gap accurately is difficult and the compensation process is complicated. Thus the process study of active compensation for the assembly gap of the wing box is carried out. By analyzing key technologies of active compensation, such as precision measurement of contact surface and finishing removal process of compensation margin, active compensation assembly without gaps of wing box skeleton and panel can be achieved, so as to improve the assembly level of aircraft wing box.

Keywords: Active compensation Gap measurement Margin removal

在飞机翼盒装配中,一般使用两种装配基准,即以骨架为基准和以壁板外形为基准<sup>[1]</sup>。以骨架为基准的装配方法,其误差积累是“由内向外”的,最后积累的误差会反映在壁板外形上。翼盒外形误差主要由骨架零件制造误差、骨架装配误差、壁板厚度误差、壁板和骨架存在间隙、装配变形等误差累积。为提高外形精度,必须提高零件制造精度和骨架装配精度及减小装配变形。

以壁板外形为基准的装配方法,其误差积累是“由外向内”的,积累的误差在内部骨架连接时用补偿的方法来消除。翼盒外形误差主要由装配型架卡板外形误差、壁板和卡板贴合间隙、装配变形等误差累积。为提高外形精度,必须提高装配型架制造精度和减小装配变形。

在两种装配基准的装配活动中,均会出现在骨架与壁板之间存在间隙或过盈的情况,为了提高翼盒外形精度通常会对间隙进行补偿,常用的补偿方法有间隙加垫、过盈打磨、可调补偿件等。但上述装配间隙补偿均为间隙出现后的被动补偿,增加了工作量,且间隙难测量,补偿量很难控制,从而影响翼盒外形准确度<sup>[2]</sup>。

## 1 发展现状

近年随着数控加工技术的发展,翼盒骨架零件和壁板的加工精度极大提高,机翼翼盒的装配主要采用以骨架为基准的无余量装配技术,无余量装配是产品设计与制造过程所追求的一种目标,为了解决零部件在飞机装配中由于零件制造误差、装配定位误差而累积形成的误差,满足飞机装配准确度的要求,达到组件或部件的协调互换要求,保证外形准确度、装配准确度、尺寸精度和互换协调等要求,通过充分协调零件之间关系和合理分配容差来实现装配前零部件不留余量或少留余量的装配方法。在装配过程中考虑误差累积,合理设计装配协调路线和装配容差及零件容差,实现装配单元的无余量装配,最终实现飞机产品的无余量装配。飞机装配中实现无余量装配有两种途径:一是通过预修配达到无余量装配;二是通过零件无余量制造达到无余量装配<sup>[3]</sup>。

当前这一装配技术大量用于金属结构的机翼翼板与骨架结构的装配,该方法的优点是利用精确保证的骨架外形进行骨架和壁板的装配,壁板可用束紧带进行压紧消除,取消外形卡板,简化装配工装,节省工装费用。这种装配方法需要骨架的高精度和高刚度,同时要精确控制壁板的厚度误差,否则对于部件的外形公差难以保证。

新一代飞机以减轻结构重量、提高结构寿命为目标从而大量采用了新结构、新材料和新工艺。在制造技术方面,除了优化和提升传统制造工艺外,还需采用新型的轻重量和长寿命制造技术,如复合材料构件的大量应用,在飞机翼盒中则使用整体复合材料壁板替代了金属壁板等。采用这一先进轻质材料和结构,可以大幅减少连接件的数量,减轻结构重量,提高结构刚度,减少机械加工费用,减少油箱泄漏源,提高隐身性能。

根据复合材料壁板的制造工艺特点,使其在非贴膜

\* 总装预研项目(513181102)资助。

面由于固化过程树脂流动的不均匀性和模具的非约束性,使得零件厚度、平面度、角度等难以精确控制。这使得复合材料飞机翼盒装配中的容差分配比全金属翼盒更复杂。目前针对复合材料壁板、骨架的装配依然采用骨架为基准进行,在过程中出现的配合问题,依然采用传统机翼盒段装配中的间隙被动补偿方法,即对于壁板与金属件刚性强的配合面产生的间隙,采用液体垫片进行补偿,其他部位采用固体垫片进行补偿,过盈部分则打磨修合<sup>[4]</sup>。然而这一系列被动补偿方法存在如下问题:

(1) 无法精确测量间隙。

在机翼盒段装配中,机翼盒段尺寸一般较大,上下壁板与骨架连接面除开周边是开敞区域外,其他区域较封闭,精密测量仪器很难进入。

(2) 过盈打磨量难控制。

在机翼盒段装配中,如果上下壁板与骨架有干涉连接区域,一般的传统方法都是人工打磨修合,工作量很大且去除量很难控制,需要往返配合观察,工作效率低下且精度很差。

(3) 液态垫片工艺复杂。

在机翼盒段装配中,对于复合材料壁板目前最常用的消除方法就是填胶,但是这种方法的工艺较复杂,且只适合小间隙量,如果间隙超过了一定尺寸就需要在胶中添加玻璃纤维等增强胶体的强度,但在实际生产中由于盒段类部件装配尺寸较大很难完全判断间隙状态<sup>[5]</sup>。

(4) 固体垫片制作困难。

在机翼盒段装配中,由于盒段的尺寸一般较大,且复合材料壁板由于其工艺特点壁厚分布不均匀,再加上骨架零件机加工和装配误差的累计,导致壁板与骨架的连接面间隙不均匀,这对于制作垫片来消除带来了很大的困难。

(5) 补偿不到位易造成复材分层缺陷。

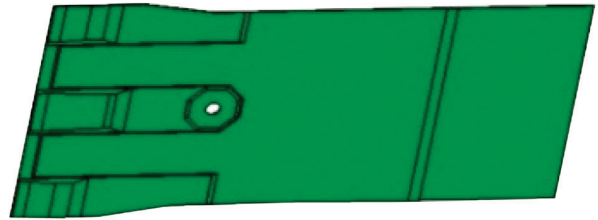
在间隙小于某值时,间隙可以凭借复合材料本身的变形来抵消而不容易产生分层;当间隙大于某值时,装配之后将产生局部分层现象,分层的范围大小基本与间隙的大小成正比。

## 2 精密补偿工艺研究

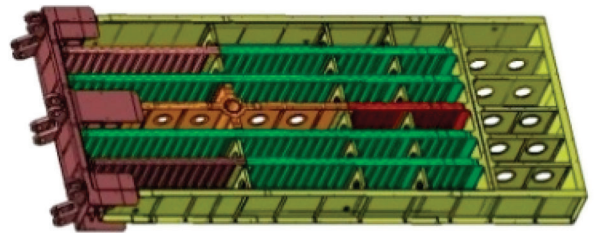
根据翼盒装配的实际需要确定工艺分离面如图1所示,为了避免在机翼翼盒装配中上下壁板与骨架装配连接中被动补偿带来的一系列问题,准备对装配间隙采取精密补偿的方式对骨架、壁板的装配间隙进行提前补偿。

精密补偿具体工艺流程如图2所示,为使骨架零件在数模阶段就预留与壁板连接面的间隙补偿量,确保在

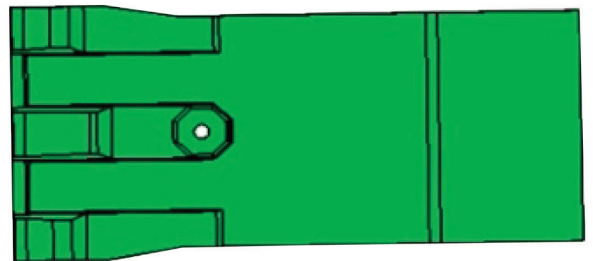
去除余量前与壁板内型面为过盈配合,并按数模加工制造,壁板在完成制造后在装配型架上安装固定到理论外形位置,通过扫描测量手段精确测量内型面与骨架连接



(a) 上壁板



(b) 翼盒骨架



(c) 整体下壁板

图1 翼盒装配工艺分离面

Fig.1 Separation surface of wing box assembly process

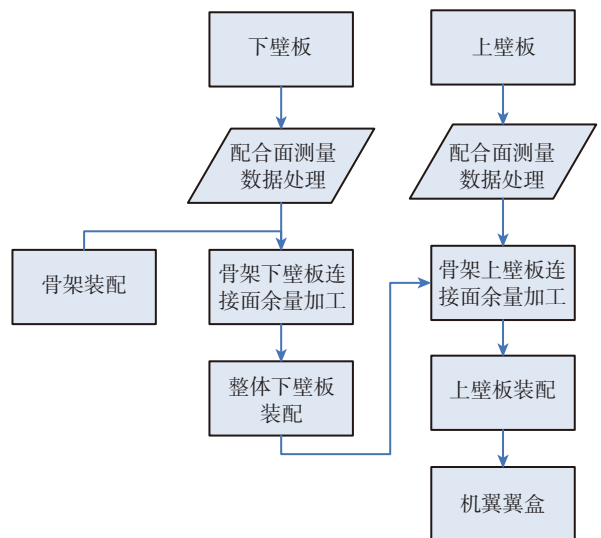


图2 翼盒装配流程

Fig.2 Assembly process of wing box

区域,之后将此数据拟合为曲面即为骨架与壁板连接的实际连接面,然后将骨架按照此曲面加工去除间隙补偿的余量。

### 2.1 精密补偿量计算

对骨架零件制造精度、骨架装配精度及变形、复合材料壁板制造精度等进行分析,确定翼盒装配可能存在间隙的最大量值,根据此分析结果修改翼盒设计模型,使翼盒骨架零件在设计阶段就预留与复合材料壁板连接区域的间隙精密补偿量,并确保在去除精密补偿量的余量前,骨架与壁板内型面的理论型面为完全过盈配合。然后按此设计数模展开对骨架零件的精确加工,复合材料壁板则按理论模型进行制造。

### 2.2 实际精密补偿量测量

翼盒壁板在完成制造后,首先分别将上、下壁板安装到装配型架上并固定到理论外型位置,然后利用激光扫描和三维照相测量技术精确测量上、下壁板内型面与翼盒骨架的连接区域,之后对测量点云展开逆向处理并生成实际的 NURBS 壁板模型,此模型计算获得的曲面就是翼盒骨架的精密补偿量去除余量后的实际装配连接面。

### 2.3 统一坐标系

从机翼翼盒的各零件的结构特点可以得到两根主梁对于翼盒骨架完成装配后的刚性作用很大,直接决定了翼盒装配后的实际外形面,所以翼盒装配要始终以两根主梁上预留的装配定位孔为基准,并要与上、下壁板的内型面装配连接面扫描计算结果统一坐标系。

### 2.4 精密补偿量余量去除

以测量数据计算确定的上、下壁板内型面实际装配连接面为精密补偿量余量加工依据,对翼盒骨架与壁板的连接面进行精加工,从而实现壁板与骨架之间的精密补偿无间隙装配。

## 3 精密补偿关键技术

### 3.1 上、下壁板内型面连接区域精确测量

#### 3.1.1 测量工艺流程

针对壁板与骨架的扫描与间隙计算,具体测量工艺流程如图 3 所示。

在壁板与骨架制造完毕后,首先预先检验零件的局部变形量与虚拟计算装配间隙。将壁板与骨架的坐标系定为产品理论坐标系,在产品理论坐标系下,对装配配合的区域进行扫描,利用专业逆向工程软件对扫描数据进行逆向处理,对壁板的扫描数据逆向处理后,在虚拟环境下将壁板与骨架装配到位,计算壁板与骨架之间的间隙,提供骨架的精密补偿量去除量。

在进行测量时,为了提高整体的测量精度,首先利

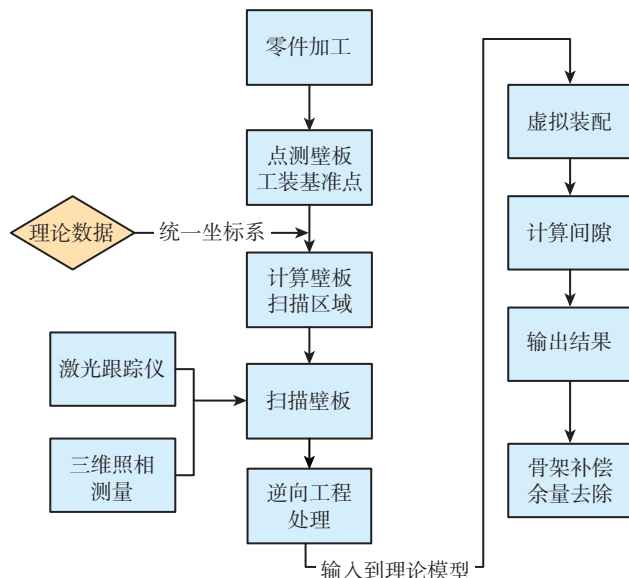


图3 测量工艺流程

Fig.3 Measurement process

用激光跟踪仪测量壁板与骨架上的基准点,在坐标系统一完毕后,利用照相测量设备对装配配合区域进行扫描,因此整体的测量过程是激光测量和照相测量相互配合的结果。在骨架、壁板间隙测量的过程中,测量点的具体布置方案如表 1 所示。

表1 测量点分类表

序号	测量对象	测量点	工具	目的
1	地标 TB 点	4~10	0.5in 靶球 × 2 6.35mm 靶座 × 2	安装装配工装 检验装配工装 建立装配坐标系
2	ERS 点	4~10	0.5in 靶球 × 2 6.35mm 靶座 × 2	建立装配坐标系

#### 3.1.2 点云数据处理

原始的测量数据通常是一些点或点云坐标数据,不能直接反应所需信息,也不能直接指导所要进行的装配工作。因此,对数据进行处理是必要的后续工作。在进行蒙皮骨架测量的过程中,对蒙皮的扫描点云数据进行逆向工程处理尤为关键。若要在 CAD 环境下测量蒙皮与骨架之间的间隙,必须要将蒙皮的点云数据生成最终的 NURBS 模型。

本方案中拟采用 PolyWorks 软件对扫描的点云进行逆向工程。PolyWorks 是当今市场上领先的逆向工程和检测软件解决方案。PolyWorks 程序包含基础部分的硬探测测量,以及点云检测和逆向工程的模块。工作流程如图 4 所示。

若已经有点云,则可以进行下一步的对齐工作,若没有点云,可以用激光跟踪仪的附件扫描仪或者照相测

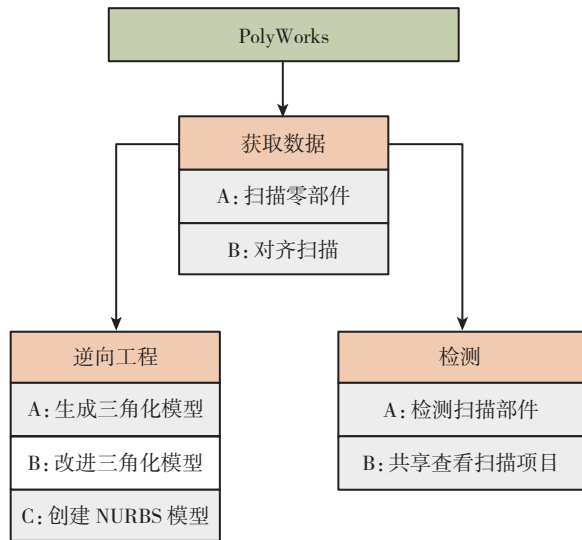


图4 典型PolyWorks工作流程  
Fig.4 Typical workflow of PolyWorks

量设备扫描一个零部件。若用激光跟踪仪进行扫描,可利用 PolyWorks 插件直接扫描,扫描后的点云直接显示保存在 PolyWorks 中;若用照相测量设备扫描,将点云数据从其他软件中输入到 PolyWorks 中,然后,精确地对齐点云。如果点云已经被对齐,则可以在逆向工程或检测前验证对齐质量。

从对齐的点云生成一个高质量的三角化模型,然后改进三角化模型以满足下游应用的要求,甚至创建高质量的 NURBS 曲面,最终生成 NURBS 模型。使用用户自定义的公差对比参考对象和对齐的点云。获取精确测量。

### 3.2 精密补偿量精加工

#### 3.2.1 翼盒骨架结构特点

机翼翼盒骨架在精密补偿面具有飞机理论型面,从骨架各零件的结构特点可以得到翼盒骨架完成装配后的刚性很强,但是骨架零件有铝合金、钛合金、复合材料,具有比较差的切削性。

#### 3.2.2 翼盒骨架加工工艺难点

机翼翼盒骨架由薄壁件装配而成,在精密补偿量精加工过程中容易产生加工变形,所以在加工工艺方案中必须采取控制零件加工变形的解决方案。

机翼翼盒骨架为双面结构,需要来回翻面加工而多次改变装夹状态,因此必须尽量缩短工艺准备时间,并提高装夹质量的稳定性。但由于骨架为装配件,故装夹位置不容易控制,难以压紧。

针对骨架精密补偿量的精加工,对骨架的定位精度要求很高,目前骨架零件的总体结构上缺少定位夹紧部位,需另设工艺凸台满足加工过程中的零件夹紧要求。

#### 3.2.3 翼盒骨架精加工解决方案

#### (1) 制定装夹方案。

为了减少装夹次数,便于自动化加工,由桥式五坐标高速铣、SR250G、S240 加工,装夹方案为卧式放置,用与零件相连的工艺凸台压紧,夹紧元件为压板,这样零件在同一工序中加工时无需改变压紧状态,节省了很多辅助时间,降低了装夹难度,提高了质量和效率,但是会相对提高夹具成本。

#### (2) 定位和基准的设定。

参考该翼盒骨架在装配型架上的装配位置、定位方案来设计铣床基准。在技术上可行的情况下,需借用装配工装进行机械加工,可显著提高多次定位、各工序间重复定位的准确性、稳定性,但成本较高。

#### (3) 加工工艺路线制定。

针对此翼盒骨架的特点,选择由桥式五坐标高速铣、SR250G、S240 加工,卧式放置方案。在工艺方案中需要制作专用的工装,并且根据工艺的要求设计零件的定位夹紧元件。

#### (4) 工艺参数的选择。

根据不同的材料,对工艺参数、刀具的参数、切削参数进行优化,达到精度、表面粗糙度、阶差等要求。

#### (5) 关键部位尺寸精度控制。

骨架结构件机加过程中实际留的余量要记录,装配过程中机加去除的余量要小于实际余量,加工过程中边测量边加工,保证零件的最小壁厚。

因为该零件外侧是具有理论外型面的曲面,所以要求的精度比较高,在进行加工时既要保证理论外型面的数据,又要保证零件壁厚的要求。精加工过程中将在机床上复测测量工序给出的加工余量。

## 4 结论

针对机翼翼盒装配间隙精密补偿方法的工艺性研究,掌握精密补偿技术的装配配合面精确测量和精加工等关键技术,进一步提高了精密补偿的可行性,提高飞机机翼翼盒的整体装配水平。

### 参考文献

- [1] 许国康. 大型飞机自动化装配技术. 航空学报, 2008(5): 734-740.
- [2] 王哲. 现代飞机机体结构模块化设计技术研究. 航空科学技术, 2011(2): 73-74.
- [3] 王勇彬, 郭敏骁. 以骨架为基准的无余量装配机翼制造质量控制. 航空制造技术, 2007(6): 62-64.
- [4] 黄侠, 袁红璇. 装配协调技术在大型复合材料机翼翼盒研制中的应用. 航空制造技术, 2008(15): 84-87.
- [5] 刘华东, 应斌, 张志强. 飞机复合材料水平尾翼装配技术. 航空制造技术, 2009(24): 26-30.

(责编 亦非)