

飞机柔性装配工装设计*

Design of the Flexible Assembly Tooling for Aircraft

西北工业大学机电学院 郭飞燕 王仲奇 康永刚 李西宁 王 龙
中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 郑堂介



郭飞燕

西北工业大学机电学院航空宇航制造工程专业博士研究生,主要从事飞机数字化装配与装备、飞机数字化装配协调与工艺规划技术研究。

飞机装配工装是根据产品的设计与制造需求,在装配过程中支撑定位产品零部件,以保持不同零件之间的相对位置关系。传统上,每个部件的装配操作过程至少需要一个专用的刚性装配工装,当产品设计更改时,工装的调整会耗费大量的时间周期。此外,为适应日益变化的市场需求,需要使用新的技术以缩短装配工

柔性装配工装在国内已经进行了部分应用,但目前对柔性工装没有统一的评判标准,通过建立柔性工装及其技术的评价模型,可为企业分析自身在行业中的地位与水平、制定合理的装备发展规划、进一步提高装备技术水平指明方向,并为实施柔性工装提供决策参考。

装的设计与制造周期。柔性装配工装技术的发展是解决以上问题的有效方法^[1]。飞机装配中的柔性工装是能适应装配环境的变化,可完成具有不同形状和尺寸的同一种族多部件装配,可满足一个产品中的结构特征的变化,甚至可满足不同结构族产品的装配需求^[2]。

国内外现状分析

目前,国外在飞机装配中大量采用柔性工装技术,以使工装更好地适应产品设计变化要求,Freeland等^[3]提出了一种适用于定位含有大曲率或复杂形状工件的柔性工装,通过控制真空吸盘生成与工件曲面外形一致并均匀分布的吸附点阵,能精确和牢固地夹持工件以完成钻孔、铆接与铣切工作,当壁板外形发生变

化时,工装外形和布局自动调整,可通过更换长桁、蒙皮夹持器,适用不同尺寸与形状的壁板组件的定位要求。Millar等^[4]提出了一种用于机翼装配的可重构柔性工装,工装静态框架用一系列采用螺栓连接的标准梁和标准连接件构造装配型架的骨架,动态模块安装于框架梁上,使定位夹紧器在工装设计给定参数范围内,借助激光测量系统,再通过定位夹紧器的微调,适用于各种复杂零件的定位夹紧,该工装原型已经在不同型号的飞机机翼装配中得到应用,甚至适用于同一飞机机翼的左右件产品,由于工装骨架靠螺栓配合产生的摩擦力来维持整个型架的稳定性,目前多用于小部件的装配中。Munk等^[5-6]提出一种机翼与翼梁的决定性装配(DA)方法,翼肋与翼梁、

* 国家科技支撑计划项目(2011BAF13B07)资助。

翼梁与壁板通过预先设计而精密加工出的协调孔连接在一起,机翼外形轮廓由翼梁与翼肋组成的骨架决定,免除或减少了常设工艺设备的使用,可减少飞机装配对型架的依赖性,DA 装配是柔性设计的基础,但实现 DA 装配的工装一般结构复杂,成本较高。Whitehouse 等^[7]提出了一种用于翼身对接的定位系统,通过定位单元的重用实现新的飞机部件的柔性装配。

国内针对不同的飞机产品,设计了大量的柔性装配工装^[8-11]:如用于壁板类组件装配的数控柔性多点装配型架、行列吸盘式壁板柔性装配工装以及壁板组件预装配柔性工装;用于机身部件、翼面类部件、机翼翼盒装配与大部件对接的柔性装配工装等,阐述了其柔性定位实现方式,描述了柔性骨架单元、定位单元、夹紧单元、锁紧单元等结构形式,并设计了相应的定位执行末端,如表 1 所示。潘志毅等^[12]提出一种飞机制造大型工装布局设计方法,依据布局约束要求,依次通过定位点级、元件级和工装骨架轴位域的演进分级获取骨架元件的合理位置,并结合人机域的求解进行工装布局设计;靳江艳等^[13]通过明确飞机设计-工艺-工

装之间的有机联系,构建了基于多集合理论的分层映射模型,实现飞机部件从设计特征到工装概念设计特征的映射。潘志毅等^[14]针对设计频繁更改这一问题,通过主几何层、源控制几何层、衍生控制几何层、工装部件层和工装设计基础库之间自顶向下和自底而上相结合的综合运算,建立了型架的变型设计模型。以上研究为柔性装配工装的设计提供了一定的参考,但无法解决多个柔性定位器的行程及布局优化,以及定位接头更换时的配合协调问题。

为增加柔性装配工装设计的合理性,实现多产品对象的柔性定位,文中通过产品工艺分析,确定柔性定位特征并进行分组;根据布置在定位执行末端上的各 OTP 点在工装基础平面的投影关系,确定各柔性定位器在 X/Y/Z 自由度方向上的运动行程与布局关系;分析定位执行末端与同一柔性定位器之间的安装更换界面结构,对柔性工装设计技术进行了研究。

柔性装配工装设计

为使柔性工装能适应装配环境的变化,完成多产品对象的柔性定位功能,柔性工装设计的核心是确定柔

性定位器在各自由度方向上的行程与布局约束关系,文中从 6 个方面进行阐述。

1 目标产品特点分析

分析需进行柔性定位的系列化产品的设计模型结构特点,获取产品设计结构模型、设计基准和典型设计结构特征,根据装配协调方法与装配准确度要求,确定多装配对象之间的精度协调关系与装配基准。

2 柔性定位特征确定

对拟采用柔性化装配技术的一组产品进行工艺分析,首先按照工艺分离面的划分与产品结构树,根据需保证的产品顶层关键特征,如外形准确度、交点准确度等,沿飞机制造树向下逐级传递分解,直到零件级,获取对关键型面、结构交点等能够对装配准确度产生影响的互换协调部位或特征,形成目标产品初始定位特征集,分别对应装配工装所需控制的定位特征,如图 1 所示。

筛选出的产品零部件与工装需要控制的具有协调关联关系的关键特征来源于产品设计数学模型,包含了飞机产品零部件或工装的关键特征实体几何的外形轮廓与设计结构尺寸,并包括特征的空间位置与相对位置关系。根据特征几何属性推出

表 1 不同产品对象柔性装配分析

| 装配对象 | 柔性装配基准 | 柔性实现方式 | 定位执行末端结构形式 |
|------|--------|--|--|
| 壁板组件 | 蒙皮外形 | 卡板安装定位支点精确重构调形,更换不同壁板组件对应的卡板 | 外形卡板 |
| | 蒙皮内形 | 以蒙皮内表面为装配基准,在柔性定位器上采用行列式布置的吸盘,通过形成吸附点阵实现不同曲率的蒙皮的定位 | 蒙皮水平、竖直边界定位、夹紧装置、真空吸盘 |
| | 长桁轴线位置 | 采用具有 3 个方向的直线运动与绕某一坐标轴的长桁夹持机构实现,通过配备不同的导向板,使长桁与不同曲率的蒙皮相结合 | 长桁夹持机构、蒙皮内形卡板与蒙皮边界定位装置 |
| 翼面部件 | 翼肋坐标孔 | 通过定位面与 2 个定位销完成翼肋的定位,端部翼肋处需实现与其有配合关系的零件的集成定位,以保证与其他部件的对接协调 | 在翼肋定位板上设置的多个协调定位孔,分别用于定位不同组别的翼肋,侧面为翼肋腹板定位面 |
| 机身部件 | 骨架外形 | 对集中于加强框与重要梁等主要承力工件上的定位交点进行定位,设计适合产品结构特点的定位接头以及可进行方便调节、数字化调整控制的定位机构,以适应孔位、孔径及基准面的变化 | 一般通过工装结合定位孔及基准面进行定位 |
| 部件对接 | 飞机坐标系 | 靠工艺接头 X/Y/Z 方向的协调运动实现,改变接头的结构形式和布设位置,以适应不同形状的大部件 | 增大与飞机部件的接触面积,采用连接面板或保形架的结构形式 |

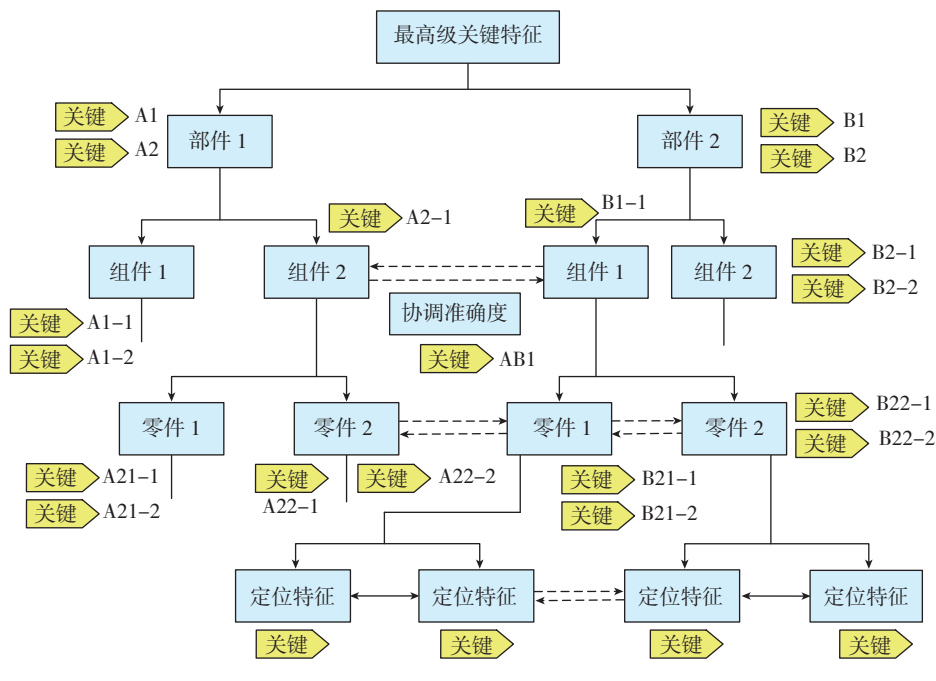


图1 产品结构与定位特征

象的设计基准,确定产品在柔性装配工装中的空间放置状态。针对具体产品零件,对比分析各定位特征的结构及在产品上的相对空间位置关系与几何形状的异同性,对产品零组件归类分析,筛选出若干相似的柔性定位特征集合,并将需要定位的关键定位特征分组。其中,各组定位几何特征之间的空间位置的差异性应尽可能大,以便布置足够数量的定位器,并保证装配操作空间。每组相似的定位特征的定位功能均由一个柔性定位器实现,以此确定定位器的数目。

各定位特征所对应的特征元及其约束信息,其中,零件内部的定位特征之间通过特征间的尺寸约束来实现,多个零件之间的定位特征则具有一定的配合约束关系。

3 柔性定位器定位功能确定

为在一套柔性工装上实现对多个产品对象的柔性定位功能,在概念上通常采用模块化柔性定位器完成。在一般情况下,3个坐标的自由运动可以定义6个自由度,分别是X/Y/Z 3个方向的移动和绕3个轴线的旋

转。在某些高精度机床上甚至可以达到8自由度运动,而针对柔性工装设备而言,由于定位稳定性和精度的需要,一般只要求控制3个自由度,即X/Y/Z方向上的移动。根据坐标轴自底向上顺序所产生的组合方式来定义柔性定位器的结构形式,如表2所示。针对柔性工装的设计和对产品的定位要求,分别对所选用的柔性定位器类型进行确定。

为满足柔性工装的结构简约性与空间开敞性,首先根据多装配对

此后,基于产品所需定位特征空间分布的分散性,结合多产品对象的出架方式,合理评估柔性工装需要具备的柔性化程度,在满足各立柱定位单元定位执行末端定位可达性的情况下,对组成柔性工装定位单元运动轴的数量进行优化设计。

4 定位执行末端设计

定位执行末端主要包括外形定位件与接头定位件,其中外形定位件的作用是确定飞机部件的气动力外形,接头定位件是为保证各部件的互换和对接接头的协调,需要具有一定

表2 柔性定位器结构形式

| 结构类型 | 组合形式 | 优点 | 缺点 | 应用场合 |
|------|-------|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| XYZ型 | → ↗ ↑ | 主要考虑Z向运动,X/Y向处于下方,立柱稳定性好,易于安装调试 | 底层空间占有较大 | 适用于正下方定位或者端部定位的工装设备 |
| XZY型 | → ↑ ↗ | 此种组合方式主要考虑Y向运动,有一定的稳定性 | 执行末端Y轴运动,所产生的弯矩较大 | 适用于两侧向定位工装设备 |
| YZX型 | ↗ ↑ → | 类似于XZY型 | 类似于XZY型 | 适用于端部定位工装设备 |
| YXZ型 | ↗ → ↑ | 类似于XYZ型 | 类似于XYZ型 | 适用于正下方定位或者端部定位的工装设备 |
| ZXY型 | ↑ → ↗ | 节省底部空间 | 稳定性较差,不易于安装 | 少见 |
| ZYX型 | ↑ ↗ → | 节省底部空间 | 稳定性较差,不易于安装 | 少见 |

的精度、足够的刚度和强度。考虑产品的定位可行性与下架方式,针对具体的产品几何特征集合,采用合理的定位方法,选择定位执行末端的设计基准,考虑制造可行性、装配操作的开敞性、安装测量可达性、更换方便性、结构刚度等因素,结合工装的结构布局,确定满足所有关键特征定位功能且最少数量的定位执行末端的结构形式及其定位特征布置。定位功能的高度集成也是柔性定位功能的一种体现方式,在设计过程中,对于在定位执行末端无法实现集成的定位特征,应该在其他工序解决或者

设置专用定位器。

此外,依据“(1)3个OTP点组成的三角形面积尽可能大,并且三角形内角大小保持在一定范围之内;(2)OTP点尽量靠近末端执行器中用以定位产品的定位点”的原则,在所设计的定位执行末端上设计用于激光测量定位的光学目标点(OTP点),以便在工装调型过程中测量它在坐标系中的位置。

5 定位单元行程与布局优化

各柔性坐标定位单元的 $X/Y/Z$ 行程取决于待装配对象的种类和彼此在工装坐标系中的摆放位置关系。

在前文叙述基础上,需对多装配对象与柔性定位器进行空间分析与布局优化,在增加装配操作空间的同时减少定位执行机构自由度行程及尺寸,进而达到降低柔性工装制造成本的目的。

按图2所示的操作流程, X/Y 自由度方向上柔性定位器行程与布局优化流程步骤如下, Z 方向情况同理。

步骤1:在工装基本框架内建立适用于激光跟踪仪定位的工装坐标系。

步骤2:在CATIA虚拟装配环境中将每个待装配产品对象与适用于本装配对象的定位执行末端装配在一起,根据2.3节中设定的“装配对象在柔性装配工装中的空间放置状态”,将2.4节中各装配对象所对应的OTP点向工装的 XOY 基础平面上投影,得到一系列的离散点集,各装配对象的离散点集的位置均不相同,可能发生重

叠。

步骤3:固定任一装配对象OTP点的投影点集,以此为基准,改变其他装配对象的OTP点投影的离散点集位置,在各分组关键定位特征对应的OTP点集形成的区域不发生干涉的情况下,分别计算各OTP点在 X/Y 方向的投影距离差值,在求得最小距离差值之和时,即可确定多产品对象在工装坐标系中的彼此位置关系。

步骤4:根据产品的位置关系,计算用于定位各组关键定位特征的柔性定位器 X/Y 方向的自由度行程,即在实际定位过程中,定位器各自由度运动行程由处于定位位置的各定位执行末端处的OTP点测量值的差值体现,即对应的投影线段长度。

步骤5:各组关键定位特征对应的投影距离差值线段的中点即为各个柔性定位器各自由度行程的中心位置,考虑安全防护装置与运动控制系统附件的结构尺寸,在满足定位可达性、稳定性、操作开敞性和人机工程等布局约束的情况下,对各自由度运动行程进行修改,完成坐标定位单元的详细设计。

6 柔性定位仿真验证

在详细设计各柔性定位器后,将工装总装数模放置在DELMIA环境下,检查工装各运动方向行程和柔性装配过程中的干涉碰撞是否满足要求,验证柔性定位可达性与工装重构可行性。通过仿真反馈确定柔性装配路径,修正柔性定位器各定位方向上的行程要求以及各立柱定位单元的空间布局,实现工装与目标产品的关联分析,并完成控制系统所需的数据集。

定位接头连接 更换界面结构分析

柔性装配工装实现柔性的方式包括以下2种:

(1)面对同一待装配产品设计

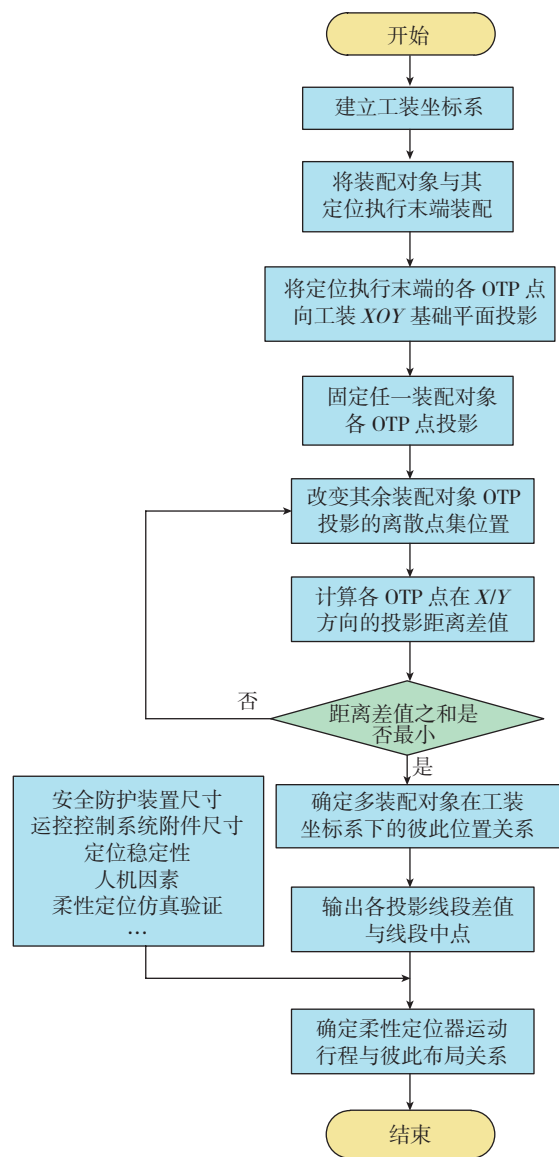


图2 柔性定位器运动行程与布局优化流程

更改时需改变各柔性定位器的布局约束关系,带动定位机构运动到待定位特征的新的位置,可通过运动控制系统调整坐标定位单元来实现,而不需要更换定位机构;

(2)面对新的产品对象时,按照具体部件装配的要求,不仅需要改变各柔性定位器之间的布局约束关系,还需要在柔性定位器上更换定位件,使之适应具体定位特征的要求。在更换定位接头过程中,多个定位接头需通过特定的连接结构形式与同一柔性定位器相连接,才能便于定位接头的数字化测量定位调整,从而保证柔性工装重构后的定位准确度。定位接头安装准确度保障方法如图3所示,包括2种工作形式。

(1)将连接端头设计为可调转接式。

为了便于数字化测量定位调整,可将某些定位执行末端设计成 $X/Y/Z$ 3个坐标分别可调整的形式:借助共用转接装置(如连接角片)与柔性定位器的安装支座上预先加工出的连接孔,用4个螺栓连接,并用2个定位销钉固定位置的方式,完成共用转接装置与柔性定位器安装支座的连接固定;借助同样的方式,在架下完成定位接头 i 与转接装置 i 的连接固定;此后,用螺栓连接共用转接装置与转接装置 i ,借助激光跟踪仪测量并调整定位接头上定位特征的空间位置,在满足位置精度要求后,在共用转接装置与转接装置 i 上配作销

孔,并用销钉定位。至此,定位接头 i 与坐标定位单元已稳固相连。

当更换产品定位对象时,只需在共用转接装置的工艺连接分离面处其他位置与转接装置 j 配作销孔,并用销钉定位,即可方便地完成定位接头 j 的位置调整。

(2)将定位件连接端头直接连接。

为保证定位接头的互换协调准确度,使用此方法对安装支座与定位接头协调配合处的加工精度要求非常高,因此其测量和检验要有专门的设备,例如在基于协调孔定位时,测量和检验中一般要对孔的位置度、垂直度、孔精度进行检查,以保证孔达到设计要求;此外,还须保证协调定位孔与接头上的定位特征的精度协调关系。

结束语

为增加柔性装配工装设计的合理性,实现多产品对象的柔性定位功能,文中从目标产品特点分析、柔性定位特征确定、柔性定位器定位功能确定、定位执行末端设计、柔性定位器定位行程与布局优化、柔性定位仿真验证方面对柔性工装设计技术进行了研究。设计了定位接头的安装更换界面结构,解决了更换时的协调问题。

柔性装配工装在国内已经进行了部分应用,但目前对柔性工装没有统一的评判标准,通过建立柔性工装

及其技术的评价模型,可为企业分析自身在行业中的地位与水平、制定合理的装备发展规划、进一步提高装备技术水平指明方向,并为实施柔性工装提供决策参考。

参考文献

- [1] Jonsson M, Ossbahr G. Aspects of reconfigurable and flexible fixtures. *Production Engineering*, 2010, 4(4): 333-339.
- [2] McKeown C. A reactive reconfigurable tool for aerospace structures. *Assembly Automation*, 2011, 4: 334-343.
- [3] Freeland M A, Way F. Reconfigurable workpiece support fixture. US, 2009/0322008 A1, 2011-08-30.
- [4] Millar A, Kihlman H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly. SAE International, 2009-11, Seattle, USA.
- [5] Munk C L, Nelson P E. Determinant wing assembly. US, 6314630.2001-11-13.
- [6] Munk C L, Nelson P E. Determinant spar assembly. US, 6170157.2001-01-09.
- [7] Whitehouse J A, Wash G H. Positioning system for supporting structural components during assembly. US, 5659939.1997-08-26.
- [8] 王亮,李东升.飞机数字化装配柔性工装的低成本化. *南京航空航天大学学报*, 2012, 4: 27-31.
- [9] 李西宁,胡框直,李维亮,等.飞机数字化柔性装配工装技术. *航空制造技术*, 2013(12): 40-43.
- [10] 郭洪杰,康晓峰,王亮,等.飞机部件装配数字化柔性工装技术研究. *航空制造技术*, 2011(22): 94-97.
- [11] 郭飞燕,王仲奇,康永刚,等.基于坐标孔的数字化柔性工装定位技术. *计算机集成制造系统*, 2013(4): 720-726.
- [12] 潘志毅,黄翔,李迎光,等.飞机制造大型工装布局设计方法研究与实现. *航空学报*, 2008(5): 757-762.
- [13] 靳江艳,黄翔,卢鹤,等.飞机设计域向工装域映射机理研究. *航空学报*, 2011(12): 2330-2337.
- [14] 潘志毅,黄翔,李迎光,等.基于飞机产品结构更改的装配工装变型设计方法. *航空学报*, 2009(5): 959-965.

(责编 亿霖)

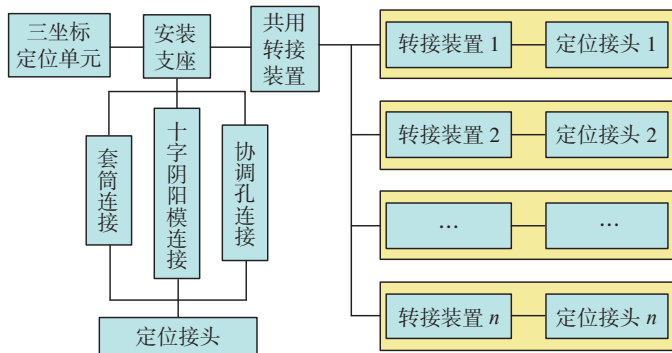


图3 定位接头安装准确度保障