

可移动柔性工装对接稳定性研究*

王 巍, 林博文

(沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136)

[摘要] 随着航空工业的快速发展,传统飞机工装已经不足以满足实际生产过程中的需要。因此,为提高生产效率,实现智能化装配过程,数字化柔性工装成为飞机工装制造的主流发展方向。通过对工装本身设计特点所需体现的关键测量特性进行控制,结合数字化测量设备坐标系建立与拟合的原理,完成可移动柔性工装在移动过程中的对接稳定性研究,进而提高飞机的测量精度和装配效率。

关键词: 柔性工装; 对接稳定性; 可移动装配; 数字化测量; 测量精度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.01/02.034



王 巍

教授,研究方向为飞行器数字化制造、飞机装配与测量技术、飞机柔性工装设计、飞机装配公差分析、关联设计技术在翼面类部件可重构装配型架设计中的应用。

为提高实际生产速率,满足当今数字化工厂的装配生产线流程节拍,世界各国飞机生产者也在尝试设计新型工装来节省飞机装配时间。柔性装配工装因生产效率高、节省制造成本的特点,在国外先进航空制造企业的生产阶段得到了广泛的应用,如真空吸盘式柔性装配工装、定位器快换类柔性装配工装等^[1]。国内新型飞机可移动柔性装配工装通过自身结构的变换与调整,提高了飞机零件的装配效率。但是,由于柔性工装自身结构拆装灵活的特点,设备的检测与调装等问题变得更为困难,已成为飞机制造业的瓶颈^[2]。

柔性工装是指在相同或相近的零部件装配过程中,因结构类似,可通过改动部分结构实现柔性定位而完成一系列产品装配过程的工装^[3]。这类工装的结构特点多变且灵活,以适应相近产品装配的需要^[4]。基于可移动柔性工装的特点,在生产过程中不可避免地需要反复移动,同一工

装在生产线上不同位置需重新定位,或者针对不同产品对象,同一工装的定位件必须按需重构。因此在安装过程中,装配对接过程或定位件重构的稳定性成为影响飞机装配精度的关键因素,可通过先进的数字化测量仪器测量工装的关键因素来保证在装配对接过程中工装的稳定性和定位件重构过程的准确性^[5]。

工装稳定性检测

1 刚性工装稳定性检测

考虑到在安装完成后便于激光测量设备对飞机工装在装配时检测,工装设计时,在框架处设计遍布工装的靶球基准点(MRP点),并在工装配套的卡板、夹具、定位器等组件上设计监测点(OTP点)。其中,MRP点用于建立数字化坐标系,OTP点用于定位零组件在工装上的位置,利用激光反射靶球实时检测这些MRP点与OTP点,其实测坐标数值越接近本身理论数值,就说明稳定性越

* 基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2018410C004)。

好。通过测量数据结果判断工装稳定性是否达到要求,保证工装的制造精度满足产品的质量要求。

传统工装的定位器在数字化检测过程中主要基于“六点定位原则”来确定空间相对位置关系^[6],通过3组空间数据点控制零部件在空间中的6个方向,从而确定在坐标系下的位置关系。一般来说,定位器的定位面上都会有3个设计监测点(OTP)衬套孔^[7],用于测量空间点坐标,以控制空间6个自由度。针对框架,为避免测量误差,需测量3遍MRP值并取平均值作为现场理论值与实测值进行比较。

2 可移动柔性工装稳定性检测

可移动柔性工装相对于传统刚性工装的稳定性不仅受到安装与振动带来的误差的影响,更主要的影响来源于工装本身移动、柔性部件和主体框架的装配和对接。工装稳定性是指主体框架在其工作站位或从其他站位回到工作站位时,框架实际位置与框架理论位置的偏差距离,以每次回到工作站位后测量得到的MRP点值与理论MRP点值之差作为主要参数,以本次MRP点值与上次测量得到MRP点值之差为次要参数。对接稳定性是指在移动框架与主体框架对接后主体框架真实位置与理论位置的偏差距离和移动框架的真实位置与理论位置的偏差距离,以每次对接后主体框架和移动框架的MRP点值与理论MRP点值之差作为主要参数,以本次MRP点值与上次对接时测量的MRP点值之差作为次要参数。因此,研究可移动柔性工装的对接稳定性检测,首先要根据由飞机结构设计和生产线布局分布决定的工装零部件组成、定位器和夹紧件的位置、与其他柔性工装的协调性互换性,确定出符合要求的主型架。除主型架工装之外,还需要相对应的左右可移动型架与主型架相互协调配合,

因此要以主型架框架为基础,制造与主型架配合的移动型架和主型架的替换工装,从而实现装配过程中的柔性化。

这种类型的工装在刚性工装稳定性检测的基础上,还需要检测移动工装型架和主型架在移动过程中为保证重复运动位置相同而设置的杯锥系统,控制杯锥系统与水平面的平面度。还有移动工装型架在与主型架对接过程中为保证空间位置相同的ROHM系统,主要检测该系统中主型架罗盘的位置度与对应移动型架罗盘的适配性。然后,通过数字化测量设备对关键测量特性进行控制,使可移动柔性工装符合生产精度要求,实现工装柔性化以提高生产效率。

3 可移动柔性工装坐标系拟合原理

数字化测量就是空间点的坐标测量,通过测量技术与MBD技术的结合^[8],主要依据反射靶球在MRP点和OTP点测量的实时坐标值(称为实测值),与设计图纸的3D数模上同一位置的理论坐标值(称为理论值)进行对比。实测值来自于空间数据测量,它是设备坐标系下的坐标值,但理论值所在的空间坐标系与实测值所在的坐标系并不重合,因此数字空间测量坐标系的建立过程就是将真实空间测量得到的坐标系与图纸理论上的坐标系进行拟合的过程。

利用激光跟踪仪测得理论MRP点的测量值,根据测量软件最佳拟合功能利用最小二乘法^[9]拟合理论坐标系和设备坐标系到测量坐标系下。设:这个工装有 m 个,基准点的理论值为 $P_m = (X_m Y_m Z_m)^T$,其中 $m=1,2,3, \dots, t$,实际测量的值为 $P'_m = (X'_m Y'_m Z'_m)^T$, $m=1,2,3, \dots, t$,运用最小二乘法求解目标函数:

$$\sum_{m=1}^t \|P'_m - (RP_m + T)\|^2 \quad (1)$$

使型架MPR点理论值与实际值建立的坐标系有最优解 R 和 T 。再通过SVD算法^[10]对目标函数进行计算:

$$\text{设 } P = \frac{1}{t} \sum_{m=1}^t P_m, \text{ 则 } P' = \frac{1}{t} \sum_{m=1}^t P'_m,$$

以及 $Q_m = P_m - P, Q'_m = P'_m - P'$

$$\text{记 } H = \sum_{m=1}^t Q_m Q_m^T = UAA^T \quad (2)$$

推导出

$$R = VU^T, T = P' - RP \quad (3)$$

当实际值坐标在工装给出的误差范围以内,代表靶球所测量的零件实际位置符合工装的理论位置。若实测值超出误差范围时,说明该零件发生偏移或者形变,应该根据理论值重新进行安装调整,调整至误差范围以内。所获取的关键测量因素(实测值)符合误差范围后,表明工装在移动对接过程中满足稳定性要求,可以进行下一步生产,如图1所示。

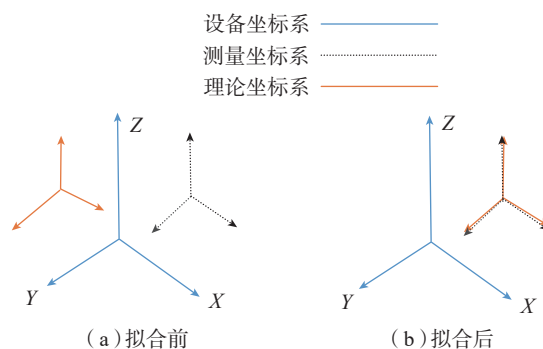


图1 坐标系拟合过程

Fig.1 Fitting process of coordinate system

可移动柔性工装对接稳定性研究

1 可移动柔性工装整体分析

在可移动柔性工装对接过程中,由于工装本身灵活可移动的特点,主框架与移动型架对接的稳定性、移动型架在移动至铣切站位铣切后回到装配站位位置是否相同的稳定性、主框架与前缘装配工装梁对接的稳定性、主框架在两个装配站位之间移动位置的稳定性,都是这种类型工装在投入正式生产之前所必须要考虑的问题。以图2中工装站位布局为例,对可移动柔性工装工作流程进行分析。主框架与移动型架之间依靠预设好的滑轨进行移动对接,对接过程依靠 ROHM 系统进行控制;移动型架依靠空中吊具吊装至铣切站位时,依靠杯锥系统对移动型架进行定位,铣切站位拥有与移动框架底部相同的杯锥底座结构以保证对接过程;主框架上部工作梁也拥有与工装梁站位相同的杯锥底座结构以保证对接过程;主框架站位之间依靠滑轨进行移动,依靠每个站位相同的杯锥底座结构以保证对接过程。

2 主框架与移动型架稳定性控制结构——ROHM 系统

主框架与移动型架对接稳定性关键在于控制 X、Y、Z 3 个空间方向的 6 个不同自由度。ROHM 系统(图3)在整体上分成两部分,一部分作为主基准分成 6 个表盘固定在主框架上,左右移动型架有 6 个与之对应的副表盘。6 个表盘从不同方向分别约束 1 到 2 个空间方向,控制 4 个不同自由度,在不影响对接稳定性的基础上,明确一个方向的表盘,可对该方向自由度不予限制,令其在该方向自由移动,达到降低对接难度的目的。例如:当一个表盘 X 方向已被其他表盘明确约束,则可以令该表盘在 X 轴方向自由移动。当对接定位完成后,主表盘上的气动钢珠自动充气锁死

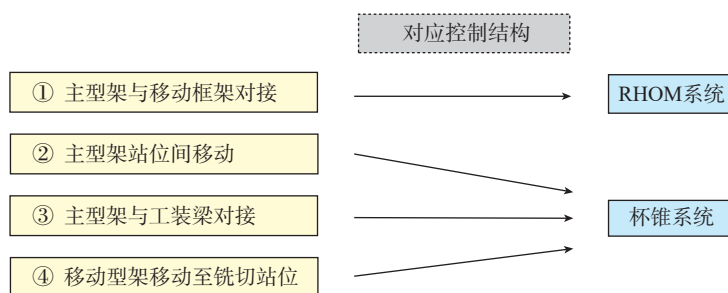
位置,实现主框架与左右壁板的对接稳定性。

3 移动对接稳定性控制结构——地面杯锥系统

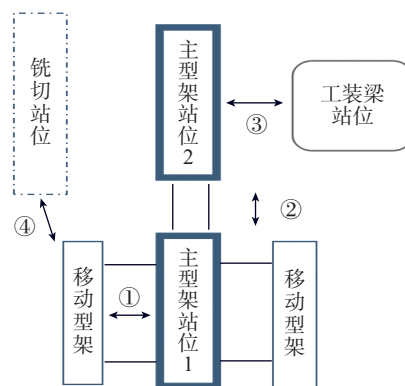
无论是工装自身移动后的稳定性还是移动型架工装借助调动吊具移动后的稳定性都可以由地面杯锥系统或类似于安装在主框架上的杯锥系统决定。在杯锥系统(图4)中,以控制 X、Y、Z 3 个方向的圆形杯锥孔作为主基准,配合控制 Y、Z 方向的长圆孔作为辅助定位基准。在杯

锥平面需测量至少 6 个目标点作为拟合平面的数据支持以保证杯锥的水平平面度,借助激光跟踪仪检测保证杯锥工作平面度 $\leq 0.1\text{mm}$,防止因自身误差影响对接稳定性。如果移动型架采用吊装移动形式,在主型架设置类似杯锥系统的同时,为防止吊具在吊装工装时在空中(向前或向后)摆动,通过框架两侧各 2 个导轮固定在顶部,控制在吊装过程中不确定的唯一空间方向。

因此,对接稳定性成为检查工装



(a) 移动对接类型



(b) 站位布局

图2 可移动柔性工装移动对接类型与站位布局

Fig.2 Movable flexible tooling mobile docking type and station layout

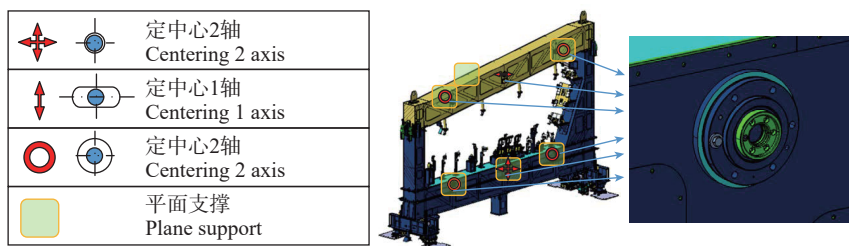


图3 ROHM系统展示

Fig.3 ROHM system presentation

是否符合标准使用的关键性技术指标,利用激光跟踪仪检测工装上的MRP点来判断工装对接稳定性,以保证工装装配准确性。

对接稳定性关键测量因素的检测

根据上文所提出的观点,以某机型飞机后机身垂尾垂直安定面可移动柔性工装为例,对该套工装的关键测量因素进行检测,分析测量得到数据,判断工装对接稳定性是否达到精度要求。

1 建立数字化测量坐标系

数字化测量本质上是空间点的坐标测量,分析在空间所测量到的点坐标值与点理论坐标值的差值,即可得到理论位置与空间真实位置的偏差结果。针对此工装,测量遍布在工装整体各个位置的MRP点即可完成数字化测量坐标系建立工作。工装对接完成投入生产前,需使用激光跟踪仪对其MRP点的坐标进行建系测量,与理论数模的坐标值进行拟合比对,根据实际情况选择适当的坐标系拟合方式减少系统计算带来的误差。在拟合过程中,需要注意外界环境,如温度、工装结构材料、人为操作因素、靶球镜反射面和工装靶球座的清洁度,同时还应避免阳光直射测量设备所带来的误差。

经过Spatial Analyzer测量软件拟合后根据拟合的结果判断所拟合的坐标偏差是否符合测量要求(是否在0.1mm以内),完成坐标系建立过程,如图5所示。

在拟合时,为避免初步拟合因跟踪仪自身坐标系与实测坐标系不重合而导致靶球接光转移测量时浪费时间,通常采集3或4个MRP点与理论数模进行粗拟合,此过程不必考虑温度材料等补偿因素,旨在完成粗略拟合节省接光时间。

2 对接稳定性关键测量因素分析

坐标系建立完成后,对主框架设

计的MRP点和为防止由于MRP点分布不均匀或者激光跟踪仪测量角度、结构设计有凹槽等原因临时设置的测量点作为对接稳定性的关键测量因素进行分析。设测量点的坐标值为 (X_N, Y_N, Z_N) ,图纸理论坐标值为 (X_1, Y_1, Z_1) ,则测量值与理论值的坐标误差为 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$,将得出的坐标误差与工装设计公差 d 比较,若 $d \leq (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$,说明实际工装位置的对接稳定性满足工装交付使用的最低精度要求。需要根据误差数值在 X, Y, Z 方向分别移动 $(\Delta X_1, 0, 0)(0, \Delta Y_1, 0)(0, 0, \Delta Z_1)$ 的偏移量,得到新的坐标误差 $\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2$,使 $d \geq (\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2)$ 。调整过工装位置后,反复对接工装数次,每次对接均测量关键测量因素,

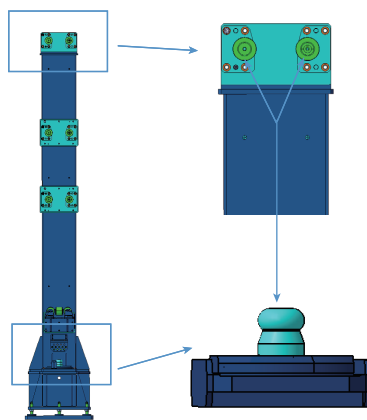


图4 杯锥系统展示

Fig.4 Cup and cone system presentation

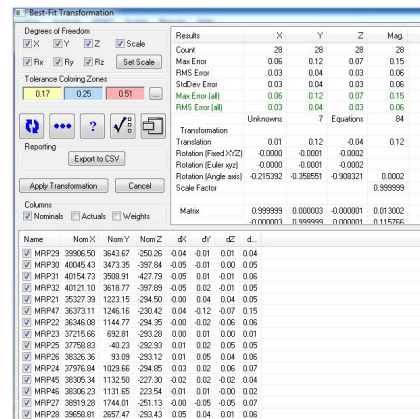


图5 坐标系拟合结果

Fig.5 Fitting results of coordinate system

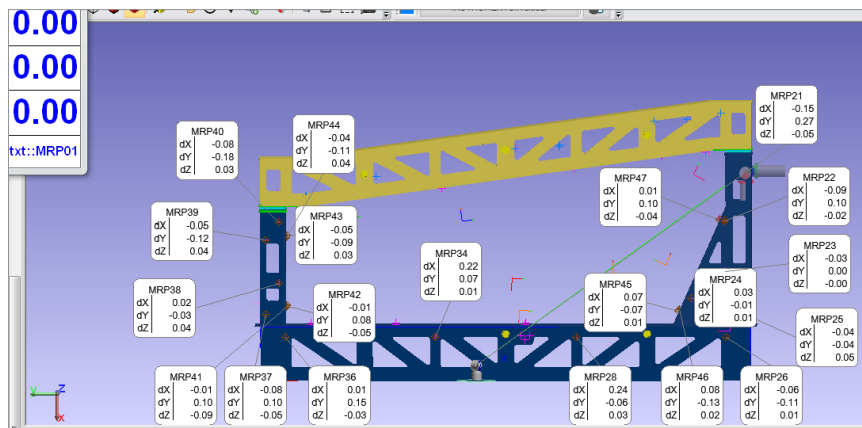


图6 测量结果

Fig.6 Measured results

时,可适当放宽 Y 轴方向误差要求以提高工作效率)。若测量结果符合要求,则证明该工装的对接稳定性能够达到要求。

结论

可移动柔性工装打破了传统刚性工装的位置固定性和功能单一性,数字化测量设备的应用则实现了在调整过程中的可视化,方便更好地研究对接稳定性分析,保证了工装重复定位的精度。我国柔性工装的设计使用已取得较大进步,但精度与效率相对于国际先进水平还有一定差距,需进一步加强研究,保证装配过程的准确性。

参考文献

[1] 朱生茂. 壁板柔性零件装配过程分析与研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
 ZHU Shengmao. Analysis and research on assembly process of flexible of parts for wall panel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
 [2] 张于. 基于统一空间测量网络的大尺寸测量方法[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 277-281.
 ZHANG Yu. Large size measurement method based on unified space measurement

network[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2011, 28(3): 277-281.
 [3] 刘洋. 飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2015(18): 7.
 LIU Yang. Application of aircraft flexible assembly method in aircraft assembly[J]. China New Technology and New Products, 2015(18): 7.
 [4] 王巍, 贺平, 万良辉. 飞机柔性装配技术研究[J]. 机械设计与制造, 2006(11): 88-90.
 WANG Wei, HE Ping, WAN Lianghui. Research on aircraft flexible assembly technology[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2006(11): 88-90.
 [5] 陈昌伟, 胡国清, 张冬至. 飞机数字化柔性工装技术研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(9): 21-24, 28.
 CHEN Changwei, HU Guoqing, ZHANG Dongzhi. Research on aircraft digital flexible tooling technology[J]. China Manufacturing Informatization, 2009, 38(9): 21-24, 28.
 [6] 全志民, 唐文彦, 刘建新, 等. 基于激光跟踪仪和坐标测量臂的工业测量系统[J]. 计量技术, 2008(5): 13-16.
 QUAN Zhimin, TANG Wenyan, LIU Jianxin, et al. Industrial measurement system based on laser tracker and coordinate measuring arm[J]. Metrology Technology, 2008(5): 13-16.

[7] 王巍, 杨亚文, 安宏喜, 等. 基于数字化测量的飞机型架装配技术研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 82-85.
 WANG Wei, YANG Yawen, AN Hongxi, et al. Research on aircraft frame assembly technology based on digital measurement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 82-85.
 [8] 贾晓亮. 关于 MBD 技术在我国航空制造企业应用的几点思考[J]. 航空制造技术, 2013, 56(3): 50-54.
 JIA Xiaoliang. Reflections on the application of MBD technology in China's aviation manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(3): 50-54.
 [9] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用[J]. 科技信息, 2010(23): 282-283.
 ZOU Yueqiang. Principle of least square method and its simple application[J]. Science and Technology Information, 2010(23): 282-283.
 [10] 李金岭. SVD 算法简介与模拟数据检验[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1998(19): 16-21.
 LI Jinling. Introduction of SVD algorithm and test of simulated data[J]. Annual Journal of Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 1998(19): 16-21.
 通讯作者: 王巍, E-mail: wwsh595@163.com.

Research on Docking Stability of Movable Flexible Tooling

WANG Wei, LIN Bowen

(Aerospace Engineering College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] With the rapid development of the aviation industry, the traditional aircraft tooling is not enough to meet the needs of the actual production process. Therefore, in order to improve production efficiency and realize intelligent assembly process, digital flexible tooling has become the mainstream development direction of aircraft tooling manufacturing. In this paper, the key measurement characteristics reflected in the tooling design need to be controlled, and the docking stability study of movable flexible controlling during the moving process is completed, so as to improve the measurement accuracy and assembly efficiency of the aircraft.

Keywords: Flexible tooling; Docking stability; Movable assembly; Digital measurement; Measurement accuracy

(责编 思齐)