

飞机数字化测量辅助装配技术及应用

Aircraft Digitized Measurement Aided Assembly Technology and Application

北京航空制造工程研究所

邹冀华

[摘要] 先阐述了数字化测量辅助装配技术的作用与优势,并对该技术实施所需分析的问题和主要原则进行说明,然后详述和分析其实施过程。最后,针对大型飞机机身段对接装配,举例说明数字化测量辅助装配技术在其中的应用。

关键词: 数字化 测量辅助装配 光学目标点 激光跟踪仪

[ABSTRACT] First of all, the function and advantage of digitized measurement aided assembly technology are expounded, and the analyzed questions and main principles needed for this technology application are explained. Then the application process is analyzed and expatiated. Finally, aimed at the large-scale aircraft fuselage sections assembly, there is an example to show the application of the digitized measurement aided assembly technology in it.

Keywords: Digitalization Measurement aided assembly Optical tool point Laser tracker

为了实现数字化精确装配,现代飞机制造中大量使用了数字化定义模型和光学测量定位技术及设备。其中,数字化测量辅助装配技术(Measurement Aided Assembly, MAA)虽然已经在国际上有了段时间的研究,甚至在某些行业领域进行了较成功的运用。但是,它在飞机制造和装配方面还较薄弱,主要是没有得到系统的研究和运用,没有形成一套完整的体系。本文探讨了数字化测量技术在现代飞行器装配中的研究和应用。

1 数字化测量的重要优势

与各种机械产品相比,航空航天工业的主要产品对自身飞行、安全等性能的追求达到了极致,无论是外形尺寸还是内部结构,从设计到制造的整个过程都需要严格而准确的控制。因此,飞行器在零组件装配、部件装配和总装对接的各个阶段都需要进行准确的操作和严格的测试,以达到几何外形的准确性、实际轴线与理论的同轴性、部件安装角度等指标的合格,同时也可

为飞行试验和新型号产品的研制与开发积累科学数据。这就需要采用高精度、高效率、低成本的数字化测量技术和设备^[1],基于以上要求,数字化的“测量辅助装配法”应运而生。该技术的作用和优势主要包括^[2-5]:

① 具有可进行大型测量工作的能力。这对于当今飞机、宇宙飞船、运载火箭等飞行器的尺寸不断增大的状况,更有价值。

② MAA的工作方法虽然复杂且成本不低,但是其使用生命周期长,长期运用在高成本的飞行器制造业中,从整个周期成本来算,其成本反而得到极大的节省。

③ 能够简化工装,使之具有更多的通用性和柔性。如应用激光跟踪仪实现无定位件装配方案。

④ 能够完成更加复杂的形位测量任务。其动态实时测量能力可以完成多目标点位置数据的同时反馈与控制。

⑤ 可以进行离线测量标定,或者通过网络异地并行工作。

⑥ 数字化测量系统与机电控制系统、机械随动装置等通过计算机组成一套完整的数字化装配系统,根据测量分析结论发出如何运动的指令,从而容易实现对机电结构运动的控制。

2 实施 MAA 所需分析的问题和遵循的原则

测量辅助装配技术包括了计算机辅助光学测量技术、“Best Fit”优化算法及特定的软件图形用户接口。这些技术的组合具有简易型架装配、更快速的装配工序、减少返工和损耗等诸多优点。它不同于传统装配工艺,有2点值得注意:第一,它依靠一套测量设备(如激光跟踪仪或数字照相测量设备)将部件定位在装配站位上。在装配过程中该测量系统还用于识别所有有关表面的精确3D几何形状;第二,在装配方案确定之后生产之前,应对关键协调部位的协调误差进行分析,如果超差则调整装配方案。因此,用一种优化软件计算部件的最佳位置,同时将其实际几何尺寸、允许的尺寸公差及理论外形考虑进去。这种Best Fit软件一旦找到部件的

最佳位置,即可与 CAD 模型比较,定出超差点。

尽管不同的供应商提供的测量系统和软件已具有一定的成熟性,但 MAA 的工业化推广应用,尤其是在装配线上推广使用仍然是一件困难的工作。为了成功,必须从开始就要针对不同的问题进行仔细分析,做出决定。所需分析的问题基本包括在表 1 中。

另外,测量辅助装配技术在应用过程中,必须遵循

表 1 MAA 工艺过程实施的问题分析

类别	分析目的	分析内容
测量系统	针对装配方案本身,建立起测量系统子域	① 部件及其站位的基准参考坐标(整体与局部的) ② 需要什么样的几何实体(表面、线、点)使部件的定点位置最优化;如何识别它们 ③ 输入数据是什么(CAD 模型、GD&T 数值、装配过程)
优化软件	如何根据这些数据使每个部件及其相对应部件的定位位置达到最佳	① 优化制定标准(特定点的间距、与形状公差兼容等) ② 最优化算法种类(最小二乘法、偏差的最小和公差包线等) ③ 与工装偏置相关的约束(如锁定平移及/或转动)
体系结构	建立完整的数据处理功能模块,辅助确立系统体系结构	① 图形用户接口 ② 数据交换标准(CAD 模型、各点坐标及其他) ③ 数据库的类型与格式

测量原理和飞机装配的一些基本原则,它们主要涉及到的有:

① “3-2-1”原则。

这是数字化测量需要坚持的最根本原则,也是设计遵循的原则之一。物体在空间靠 6 个自由度确定其正确位置,而 3 点可以确定一个平面,即一个物体上至少取 3 点进行三维坐标测量,必定可以确定其空间位姿。这 3 个点称为光学目标点(Optical Tool Point, OTP),而对于它们的 9 个坐标值,只需选取其中 6 个使用就够,选取原则即为“3-2-1”原则。

② 自由度分离原则。

按“3-2-1”原则可以确定定位件空间位置,但当调整定位件上某一个光学目标点的坐标时,其他 2 个点的坐标也会随着变化,给装配带来困难。为此,设计人员必须坚持自由度分离原则设计工装,即当调整某个自由度时,其他自由度尽量不发生变化。对于工装或定位器一般可用组合结构,如图 1 所示的应用过程,采用 3 个直角型材及一个平板的组合,将自由度进行分离。

③ 公差分配原则。

通常情况下,产品装配最终公差 = OTP 安装公差 + 零件制造公差 + 仪器系统误差^[6-7]。按照经验,以 OTP 来实现的安装/装配公差要求取为工程公差的 1/3;当工程公差很小时,OTP 的安装公差为工程公差的 1/2。在某些情况下(如产品装配最终公差要求不太高时),仪器

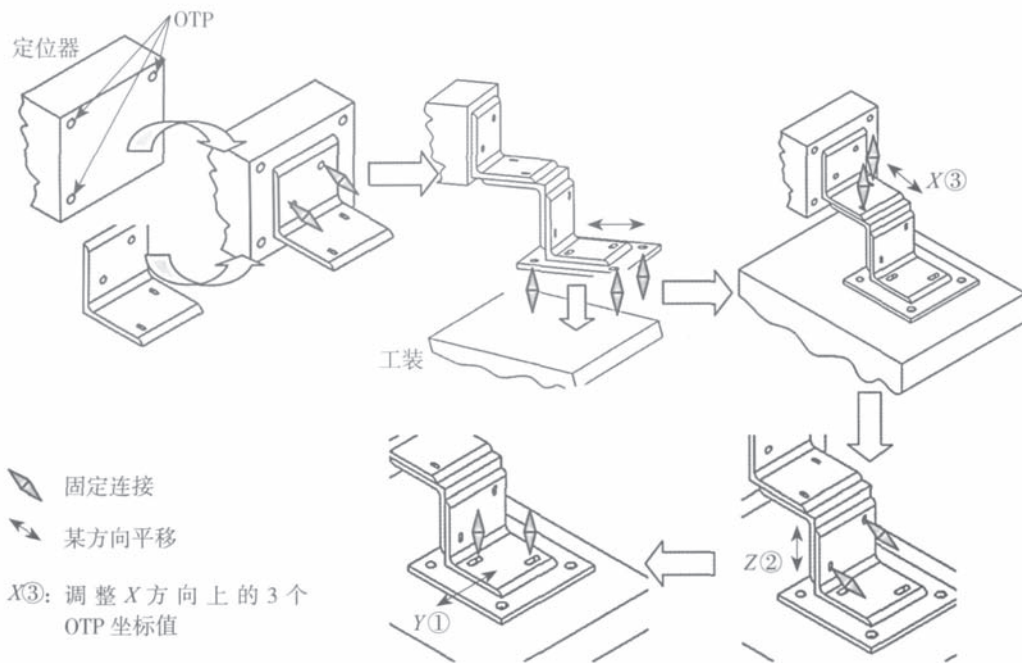


图 1 自由度分离原则的应用过程

Fig.1 Application progress of DOF separation principle

系统误差有时候可忽略不计。具体情况下可调整 OTP 安装公差和零件制造公差的值,从而保证装配顺利完成。但 OTP 的安装公差与型面的制造公差之和不得大于工程公差的 2/3。

④ 主要平面选取原则。

主要平面是指对产品零部件或装配工装型面空间位置准确度影响大的平面。无论是产品直接装配还是先定位工装装配,通过比较装配对象在飞机坐标系 XOY 平面、YOZ 平面及 XOZ 平面内的投影面积大小的方法来确定。它是最能保证装配对象空间位置准确的平面,在 MAA 技术中使用广泛。优先选择主要平面为工作面,并在此平面上布置 OTP。

3 MAA 实施过程

一旦分析且解决了所有这些问题,即可实施 MAA。通常情况下,MAA 实施原理如图 2 所示。

MAA 硬件应包括一套新型的光学测量跟踪仪器及轻便的坐标测量设备,软件方面可开发专用的程序,以求解出一套最佳匹配运算方法。通过两步算法计算出最佳位置。第一步是将所有点的定位从它们自身的坐标系转换为站位坐标系。第二步算法则使其中一个装配部件与相关装配件的位置达到优化,并考虑到操作者所用的装配惯例。当确定了装配单元间的最佳位置后,即编制出一份完整的报告。该报告为操作者提供了调定型架位置所需的全部信息,以实现 2 部分装配单元间的最佳连接。该报告还可提供对装配工序的全程跟踪。

图 3 是一个 MAA 系统应用的流程。其中,测定装配现场上的一组固定点数据,是便于在激光测点的位置改变时能重新定位,如位于操作地点或装配轨道上的 4 个定位点。在装配连接面上测定一组数据,通常选择关键、重要的特征位置,如装配孔位、外形面、对接零

件基准面等。测定过程通过一种专用软件,可实现自动驱动,为达到装配现场操作人员便于使用的目的,可设计专门的图形用户接口。

MAA 系统识别、提供装配连接面的实际几何结构,然后由一种优化软件对数据集进行计算,以确定装配、对接 2 部分之间的相对位置关系。最后,将最佳位置数据传送给控制系统,再驱动数控机构准确定位。此外,数字光学测量跟踪仪器应具有实时跟踪测量、检验、校准的功能,通常一台仪器不一定能实现该功能,可通过多台或多种设备组合来完成。实时跟踪测定的装配效果会优于分步步进式测定的装配效果。

4 大型飞机机身段对接测量示例

在大型飞机机身部段对接工程中,整个数字化测量系统作为大部件的位置测定与反馈装置来使用,它与定位器等装置组成实时闭环控制系统。其具体工作过程为:测量设备将捕捉到的信号进行处理,生成机身部段的位置信息,然后与对接控制系统通过工业以太网进行通信,控制系统对来自各部段采点的激光跟踪位置数据进行处理,计算部段的实时姿态,还原成实际几何外形模型,并与理论对接的模型进行比较,得出部段的位置姿态误差,从而计算出部段各个定位器移动所需的指令值,最后发送给定位器进行姿态调整,使部段实现两两精密对合。

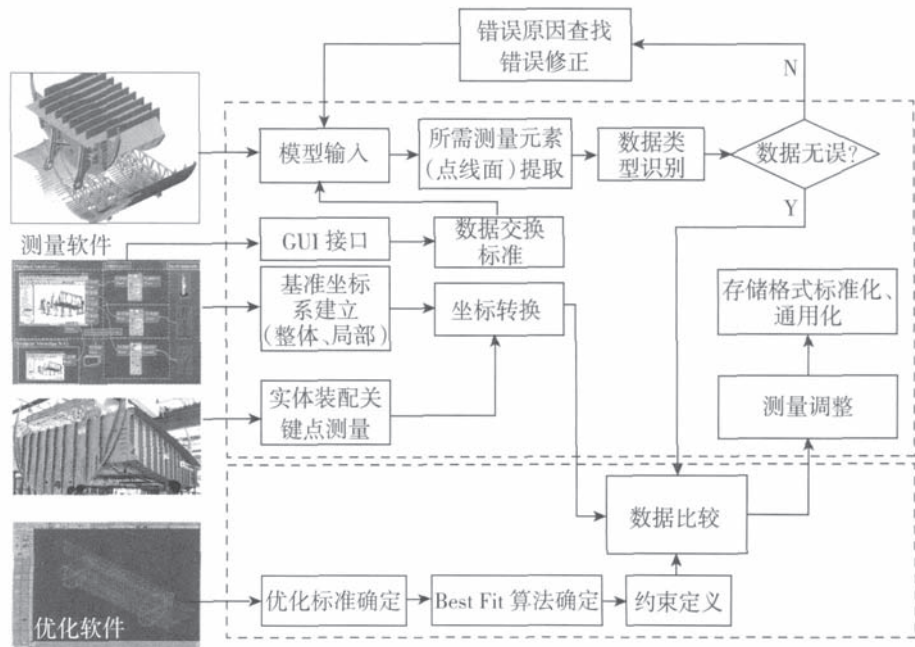


图 2 MAA 实施原理图

Fig.2 MAA implement schematic diagram

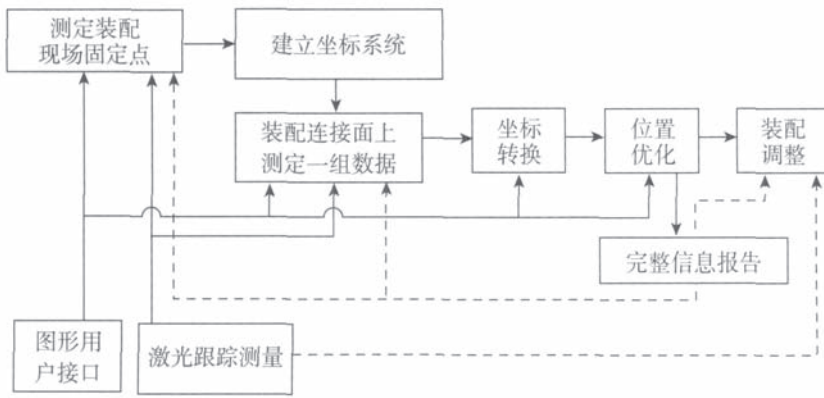


图3 MAA 应用过程
Fig.3 MAA application progress

在此,我们拟定采用激光跟踪仪或 iGPS 测量设备进行工作,并分别分析在对接装配工作过程中的关键问题。

① 坐标系选取。

激光跟踪测量方式则一般可以水平地面为定位基准,即在地基平面上钻出多个孔,插入永久性靶标座(地标),相互之间较远距离均匀排布,且要能够包络整个装配空间。每次设定坐标系时,选出 6 个靶标座,其中 1 个作为将来坐标系的原点,3 个作为辅助检验校准的冗余点。将测量数据坐标值输入测量软件,并自动建立和转换到那个原点上的直角坐标系。

对于 iGPS 测量方式,因为其无隐藏死点的测量特性,其坐标系可在空间范围内任意位置人为选定,所以可以选成机身全局坐标系,或与激光跟踪仪方式相同的坐标系。

② 测量点设置。

测量点选取工作包括测量光束的发射和接收 2 部分。对于 iGPS 方式,必须设置其发射器的位置;而接收部分有接收传感器(iGPS 的)或靶标工具球(激光跟踪仪的),且要分别确定其在定位工装和装配产品上的位置。如图 4 所示。

- 确定 iGPS 发射器位置。iGPS 的发射器必须安放在测量空间(这里就是装配厂房)的四周,且必须保证在 4m 范围内至少布置 1 颗发射器;全方位布置,即涉及到天顶、四壁和地板,目的是为了能够消除隐藏死点;要能保证在任意一点位置上都能有至少 2 颗发射器射出的红外线直线光束接触到它(一般采用 3 颗冗余测量法)。

- 在托架工装上的位置。对接部段先在托架上安装再移动靠近装配,所以在远距离移动时,靶标工具球

或接收传感器要在其上至少布置 3~4 个 OTP 点,且相互距离应尽量远离,可分别靠近托架的 4 个顶角,相邻 2 个点应具有某一相同坐标,如沿 X 方向上的 2 个 OTP 设计成 Y 坐标值相同。

- 在装配部段上的位置。移动托架时也可以直接在对接产品上设定 OTP 点,这样做减少测量误差累积环节,更易于实现产品空间位置的准确测定。可以在 2 个对接部段的对接面上各选取 3~4 个 OTP,并考虑到

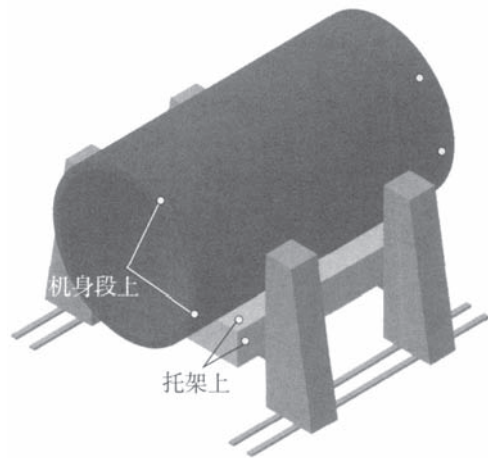


图4 OTP 点设置
Fig.4 OTP setting

部段靠近时不会挡光。

③ 调整测量流程。

机身大部段运送到对接区域内的过程,采用的是天车吊装到位,或者 AGV 运输车运送,但是一开始时运动范围大且要快速运动,则定位精度必然不高,所以,可以在一开始的时候就把对接部段固定在可移动托架上,并在托架上设置 OTP,然后快速控制 AGV 托车或定位支撑柱来移动调整到对接区内。

对于 iGPS 可以同时多点采集数据的特点,在托着部段移动运动时可以实时测量出托架的位置,进而得到产品的空间位置。这在大空间范围内远距离运动非常方便。而对于激光跟踪仪,如果按照“四路激光跟踪测量”冗余系统原理,需采用 4 台激光跟踪仪同时测量 4 个 OTP 点,则也可以实时得到产品运动位置,但此时要注意测量光线在运动测量过程中不能有间断(断光)现

象,虽然现在激光跟踪仪具备一定的断光续点功能,但精度会大打折扣,并且在软件编制上要能实现多台同时操控能力。如果只有一台激光跟踪仪,则必须采用步进测量、步进调整方式,即对4个OTP轮流测量一次,将测

量数据传入计算机软件处理,确定下一步调整方向和方案,然后伺服控制调整托架移动一定距离范围,停下再进行4点循环测量、输入处理、调整等,直到位置正确(在对接要求的精度范围之内)为止,见图5。

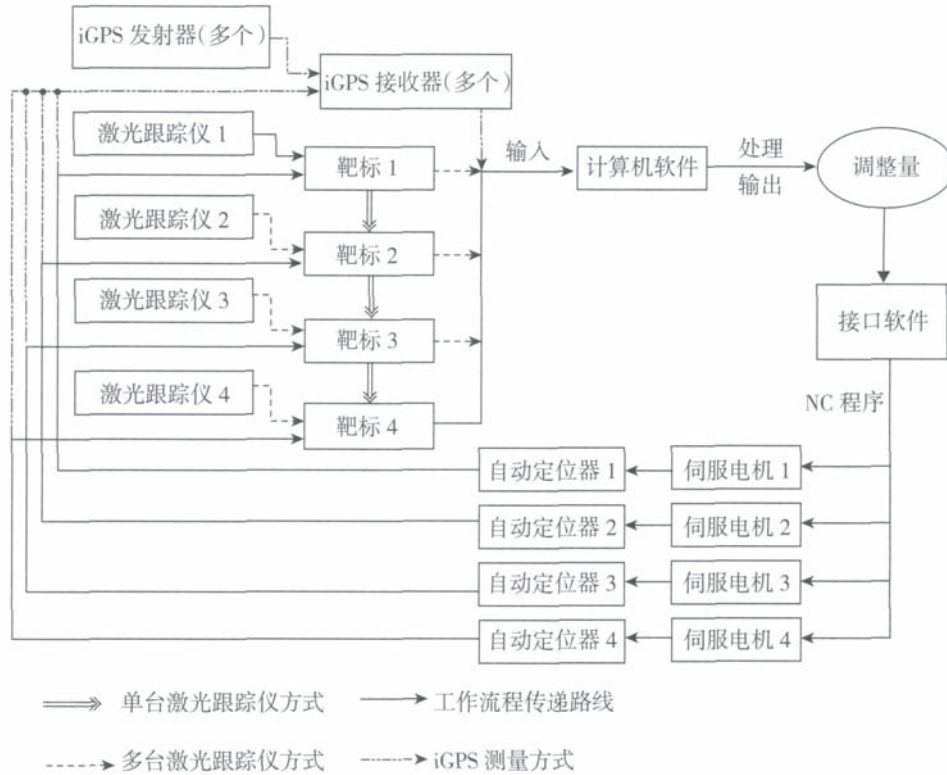


图5 部段对接测量流程

Fig.5 Section assembly measurement flow

基于以上可以完整建立出一条对大飞机部段的测量辅助对接装配的工作流程及各步操作、工艺规程等。此外,还可对数字化测量辅助装配原理和具体过程进行预先计算机模拟仿真分析,进而提早发现问题、解决问题。

5 结束语

在飞机制造技术迅猛发展的今天,数字化测量辅助装配技术在飞机装配中的作用越来越重要,地位越来越凸显。采用数字化测量系统不仅可以大幅度提升现代飞机装配的质量和效率,而且更能适应上层的飞机数字化设计,打通从设计、制造到装配的数字化、一体化流程,并且对我国新一代飞机制造技术赶超国际先进水平,增强我国航空制造业国际竞争力,带动飞机生产模式的深刻变革,实现飞机敏捷制造,都大有裨益。

参 考 文 献

- [1] 张春富,张军,唐文彦,等. 激光跟踪仪在大尺寸工件几何参数测量中的应用. 工具技术,2002,36(5): 26-28.
- [2] Large scale mapping & alignment. Technology application by materials & process technology. The Boeing Company, 2002.
- [3] Hartmann J, Zieve P. Wing manufacturing: next generation. SAE Aerofast Proceedings, 1999(4): 9-14.
- [4] Muske S, Salisbury D, Calkins J. 747 data management system development and implementation. Long Beach: Boeing Large Scale Metrology Conference, 2000.
- [5] ASME Y14.5M-1994 Dimensioning and Tolerancing. American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [6] 刘舒红. 数字化技术在装配工装研制中的应用研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2004.
- [7] 程宝冀. 飞机制造协调准确度与容差分配. 北京:航空工业出版社,1987.

(责编 玉龙)