

# 数字化测量系统在大部段对接装配中的应用

## Application of Digital Measurement System in Major Part Butt

北京航空制造工程研究所 邹冀华 周万勇 邹方

**[摘要]** 分析了数字化测量系统的作用和构成,并针对飞机大部件对接,阐述其辅助装配流程,测量数据处理以及测量环境的布置等问题。本研究为数字化测量技术在飞机装配中的工程化应用提供了技术基础。

**关键词:** 数字化 测量 装配 大部段

**[ABSTRACT]** The function and the composition of the measurement system are analyzed. Aiming at one major-part butt item, the aided assembly process, the measurement data treatment and the measurement environmental layout are expatiated. Through the study, our technical base is expanded for the engineering application of the digital measurement technology in the aircraft assembly.

**Keywords:** Digitization Measurement Assembly Major part

当今飞机装配技术正向着数字化、自动化、柔性化方向发展,这是飞机装配领域发展的必然趋势,它使得装配效率和质量得以大幅度提高。而在飞机数字化柔性装配技术体系中,测量辅助装配子系统成为其重要组成部分,并使用了数字化的高精度光学测量设备<sup>[1]</sup>。它对定位机构、目标产品等进行监控,并采集装配对象的必要位姿信息,处理、传递数据信息给中央控制台和控制系统,以帮助自动定位机构的调姿运动。

当前国际上用于飞机装配的先进测量技术和设备越来越多,如应用在 787、A380、F-35 等最新机型的数字化装配中。几种主要数字化测量系统在飞机装配中的应用见图 1<sup>[2-3]</sup>。

### 1 测量系统的作用

在飞机数字化柔性装配系统中,测量是“眼睛”,计算机软件是“大脑”,控制系统是“神经”,自动定位器机构是“手脚”。测量系统的目的是为了更准确地“看”到物体,进行识别,并将有效的信息传递给“大脑”,如图 2 所示。整个测量辅助装配的流程包括了测量采集、数据处理、数据传递与存储、反馈控制等环节。

通过激光跟踪仪等光学测量设备与地面测量点建



图1 激光跟踪仪、iGPS、激光雷达在新型飞机装配中的应用  
Fig.1 Application of laser tracker, iGPS, laser radar in new aircraft assembly

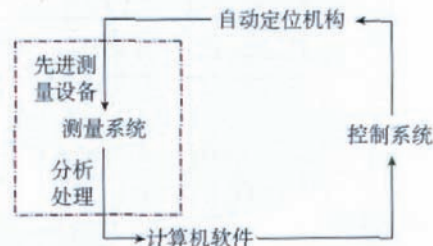


图2 测量系统在飞机数字化柔性装配系统中的作用  
Fig.2 Role of measurement system in aircraft digital flexible assembly system

立装配坐标系,并与自动定位器、对接部件上测量点等建立关系。通过激光跟踪仪自身的坐标系,将地面基准、定位器基座基准、定位器顶端连接处位置、对接段产品的空间位姿以及飞机理论坐标系等相互联系起来(见图 3),从而可以在装配过程中确定出各个待测对象的位置,以便接下来的仿真分析、后置处理和伺服控制调整<sup>[4]</sup>。

### 2 测量辅助装配子系统的构成

在硬件方面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。目前,大尺寸空间测量设备主要包括激光跟踪仪、iGPS 测量系统、激光雷达、摄影测量设备等。数字光学测量仪器应具有实时跟踪测量、检验、校准等功能,通常 1 台仪器不一定能实现飞机数字化柔

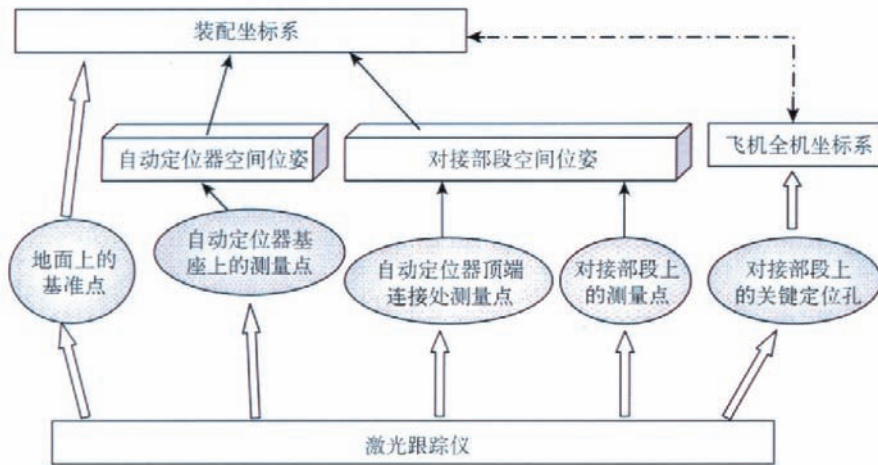


图3 测量点和坐标系的关系  
Fig.3 Relations diagram between measuring points and the coordinate systems

性装配需求,则可通过多台或多种设备组合来完成。

在软件方面可开发专用程序,以求解出最佳匹配运算方法。通过2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统一的装配坐标系;第二步算法则用于计算将装配部件运动到所需位置(如对接目标位置)的运动量,即平移距离和转动角度等,并考虑到了操作者所用的装配惯例。当确定了装配对象间的位置关系后,在中央计算机内部可将处理的数据信息传递给控制系统,或编制出1份完整的报告,该报告为操作者提供调整定位器位姿所需的各种信息。

### 3 测量系统用于辅助装配的流程

对飞机大部件对接装配实际过程而言,从对接部件吊装定位到最后对接上准备连接,整个过程的测量控制调整采用基于激光跟踪仪的数字化测量子系统,其测量辅助装配流程见图4<sup>[5]</sup>。

(1) 建立基准坐标系: 部段装在型架上后需要确定其在装配坐标系中的位置,因此建立的基准坐标系即装配坐标系应尽可能与设计时理论的整体坐标系一致。

(2) 激光跟踪仪测量对接部段上各关键特征(Key Characteristic, KC)点坐标,确定出该段在装配坐标系中的实际空间位姿。

(3) 根据实际空间位姿,与理论模型进行比较,可以推算出对接部段在对接状态下应处于的空间位置,将这个结果作为对接移动的“目标”。

(4) 根据部段在定位器上的初始位置和之前得到的“目标”,设计并优化部段装配移动的路径,并编译生成控制系统语言,输入到伺服电机控制系统中,驱动调

姿机构运动。

(5) 自动定位器调姿运动过程中,实时监控和测量大部段上各点坐标,计算出其实时位姿,并及时修正运动路线,直至最终对接到位。

### 4 测量数据的处理

用光学测量设备采集到的各种测量数据,需要进行必要的处理、分析,才能很好地应用

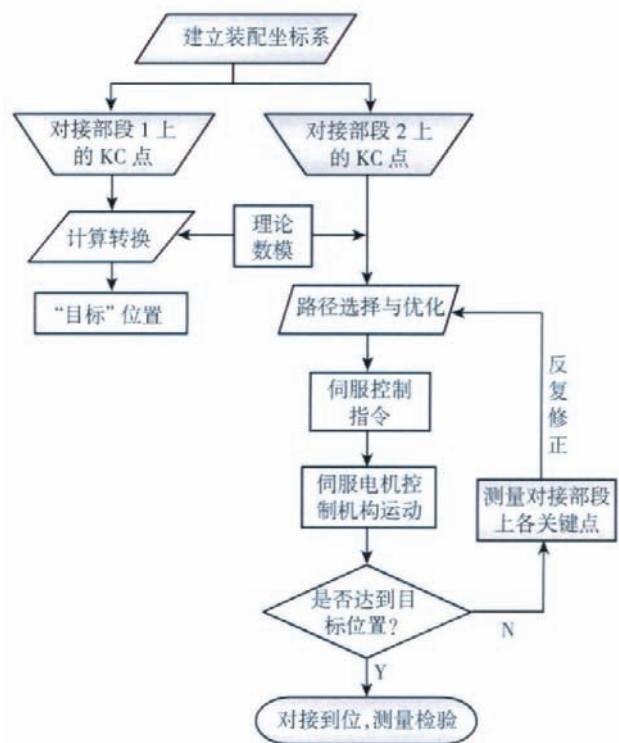


图4 飞机大部件对接中的测量辅助装配流程  
Fig.4 Measurement-aided assembly flow in aircraft major-part butt

于后续装配工作环节中。在飞机对接装配过程中,测量数据至少需要进行以下3方面的基本应用和处理。

(1) 测量数据坐标转换。

在使用激光跟踪仪这类测量仪器时,采集到的原始坐标只是仪器设备自身坐标系下的数值,必须根据装配人员的需要进行转换,如对接要在全机坐标系下工作,则就要将其转换为装配坐标系下的坐标。当然,这要依靠地标等基准点来实现。测量数据常用到的坐标系统有飞机坐标系、部件局部坐标系、工装坐标系等。

(2) 对接轨迹规划计算。

在大部段对接装配过程中,往往需要进行1次或多次的运动调姿,方可到达目标位姿,即对接状态。这就需要在已知对接调姿部件的初始状态和目标状态的前提下,规划最优运动轨迹,并在轨迹中合理插值设置多步“中间位姿”,且计算获得对接部段从前一步位姿运动到后一步位姿的空间6个自由度的变化量。

(3) 测量误差分析。

测量系统在进行数据采集和辅助装配时会带入多种误差,这对最终装配结果会有一定的影响,因此要有对测量数据的误差分析。测量数据误差除了主要来自于测量设备的固有误差、测距带来的误差和转站误差外,还有环境变化的影响。对于激光跟踪仪,它可以对温度、湿度、压力的变化进行一定范围的补偿,从而减小环境对测量数据的影响;而对光线、气流等环境因素的影响,由于难以直接补偿,常靠人为控制。

### 5 飞机大部段对接中的测量环境布置

测量系统在飞机数字化柔性装配系统中应用时,首先必须解决好测量环境的设计问题,即测量场(测量系统根据测量仪器设备所能覆盖的测量范围)的布置。这对整个测量系统的数字量数据采集和传递,提高测量精度,顺利实现辅助装配都大有益处。

#### 5.1 建立坐标系

根据控制系统、测量系统、调整算法等的需求,必须在装配方案中提前明确该装配系统所使用到的相关坐标系的数量、种类、名称等,并做详细定义和说明。要求概念清晰,种类尽量简化、减少,各坐标系之间的关系要明确,在算法中应有各个坐标系之间的关系框图及转换关系图等。用于建立坐标系的基准点的具体要求包括:(1)以地面上平整、稳定的点作为基准点的靶标(Tooling/Ball, T/B)位置;(2)间隔较大,多方向(非一条线上)排布,覆盖整个测量场;(3)至少3个T/B点才能进行建立坐标系的操作,更多的点拟合效果更好;(4)这些点的实测值与其理论值进行拟合,所建立的坐标系称之为现场装配坐标系,整个机翼对接过程都在此坐标系下完成;(5)所建立的全部坐标系采用笛卡尔坐标系。

#### 5.2 布置激光跟踪仪位置

基于对接精度要求、装配工艺流程要求、性价比分析等的考虑,常常采用激光跟踪仪作为主要测量实施设备。按照激光跟踪仪测量原理和空间几何算法,3点可以确定物体空间位姿,故至少需要3台激光跟踪仪对装配大部段上3个KC点进行实时测定。在使用少于3台激光跟踪仪的情况下,推荐使用步进式稳定点轮换测

量方式,且考虑以下要求。

- 激光跟踪仪布置位置必须能保证测量全过程中不发生断光、颤动、碰撞等。

- 距离尽量靠近对接区。10m范围内仪器精度达到0.05mm以内。但激光跟踪仪还不能过于靠近,测量俯仰角不宜过大(Leica LT最大俯仰角45°; API LT最大俯仰角85°),过大的俯仰角和测量头转动速度有可能会使得测量精度降低。

- 激光跟踪仪基本高度小于1.7m,因此如若考虑测量较高空间范围,则可将激光跟踪仪安装在型架平台上,即将其抬高从上方测量。

#### 5.3 布置各测量点

针对飞机大部段对接中的数字化测量辅助装配,一个主要任务就是对靶标工具球(即测量点)的位置布置设计,即确定其在自动定位器和装配产品上的准确位置,各测量点主要包括表1中的3类。

表1 各测量点的布置

类型	测量点布置位置	功用
地标点 T/B	厂房地面上	建立现场装配坐标系
装配产品部段和工装上的测量点 PT	部段上制造准确的孔位(定位K孔)	用于将机翼局部坐标系与实测数据关联一致起来,作为对接装配的测量基准数据
	定位器上预先制出的孔位	用于定位器位置标定和检定
对接面上的测量点	2个相互对接部段的对接区附近	进行仿真模拟确定机翼对接面形位误差及合格性判断

##### 5.3.1 地标

地标点在此主要用于建立坐标系,其位置理论坐标值应有详细列表。地标座可以采购成品,如徕卡公司的Foundation Baseball,外表面钢制材料,其直径约51mm,高度约32mm,在厂房水泥地面上钻一个直径52mm、深33mm直孔,将其嵌入,上表面与地面平齐,四周缝隙用环氧树脂填充。它配合1.5"棱镜反射镜进行测量,以建立坐标系。当然,也可以自行设计简易地标座,但要准确计算所放置靶球的球心位置坐标值。

##### 5.3.2 装配产品部段上及工艺装备上的测量点

(1)对接装配部段上的测量点设置在运动过程中不易发生挡光干扰处,在不易变形处和主要承力点附近,并要求在大部段位置由制造保证精确,其作用是用于将机体坐标系与装配坐标系一致起来,二者能进行转换。

测量点靶标采用0.5in(1inch=25.4mm)RRR(CCR)

靶球,配合  $\phi 6.35\text{mm}$  的靶球座,且根据对应测量点的孔位状态可采用相应的转接座或衬套。而有的点隐藏较深,根据情况可增加隐藏点转接工具或用 probe 测量。

(2) 支撑定位工装上的测量点采用工装部门设计给定的 T/B 点和 ERS (Enhance Reference System) 点,但是在对接装配中只作为补充使用。一般情况下,可认为部段在工装上安装准确,该工装上的点无需检测。

(3) 自动定位器上的测量点包括定位器底座上的测量点和工艺接头上的测量点。前者是为了确定自动定位器在装配坐标系中的位置,以及用于对接系统在工作一定时间后进行系统检定。后者用于确定对接初始时连接球头球心位置,作为运动算法的输入参考。

### 5.3.3 对接面上的扫描点

在对大部件对接面进行测量时,其表面上制孔的位置精度和孔径精度难以达到测量需要,因此不易布置测量孔位,而改由 Scan 扫描方式测量对接区面。这类点用于对接开始前的仿真分析,以检验对接两端的误差是否在要求范围内,如果超大,不能实施自动对接工作。

## 6 结束语

数字化测量技术正随着飞机数字化柔性装配技术体系的发展而不断发展,其目标是实现高精度、高效率的完全自动化、柔性化装配。因此,该技术的发展和运用必然会极大促进当代飞机新型制造模式的变革。

虽然有资料表明,国外采用数字化测量辅助装配技术已在飞机数字化柔性装配系统中进行了初步工程应用,但其中仍有很多问题存在,有些难点还需投入更多人力、物力去攻克。数字化柔性装配的目标是高精度、高效率,而受到精度限制,还无法完全实现全自动化装配,主要原因如下:(1) 测量设备精度是影响整个 DMAA 过程的基本因素;(2) 数据筛选机制和处理算法的建立很重要,这直接影响到系统精度和稳定性的提高;(3) 变形问题,在越大的飞机装配工程中就越为重要,很好地解决该类问题直接影响装配精度;(4) 多种数字化测量手段的未合理运用。

基于本研究,北京航空制造工程研究所已将该技术在国内外某型机大部件数字化对接装配中进行了开发,并即将用于工程应用。这大大推动了我国数字化柔性装配系统的研制,使之接近国际先进水平。

### 参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术,

2009(24):42-45.

[2] Marguet B, Ribere B. Measurement-assisted assembly applications on airbus final assembly lines. SAE 2003-01-2950, 2003.

[3] DeLand J. Large scale assembly utilizing laser radar & IRGPS. SAE 2004-01-2831, 2004.

[4] 邹冀华. 飞机数字化测量辅助装配技术及应用. 航空制造技术, 2009(24):48-52.

[5] Zou J H, Xu G K, Li G L, et al. The iGPS measurement technology application for the aircraft flexible joint assembly. SAE 10AMAF-0015, 2010.

(责编 良辰)

(上接第 51 页)

## 3 应用实例

方案在某型导弹装配数字化测量中已经成功应用并取得了较好的效果。图 5 为某型导弹装配精度自动化测量流程建模。

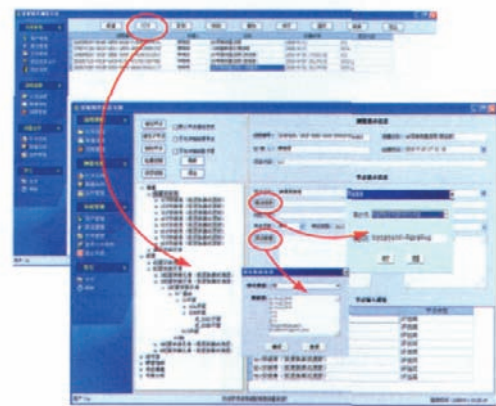


图5 导弹装配精度测量流程建模

Fig.5 Modeling of measurement procedure for missile assembly precision

## 4 结束语

影响飞机柔性装配测量不确定度的因素很多,因此对其不确定度进行分析和评估难度很大。其中的难点和关键技术主要有基于产品数字模型的测量方案建模技术、测量过程分布式仿真及不确定度预估技术、集成测量算子库构建技术、测量后置处理自动化及可视化展现技术等。我国的飞机柔性装配测量技术与国外还有较大差距,对于测量过程中不确定度问题的研究将极大地促进我国飞机数字化柔性装配技术的发展。

### 参考文献

[1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9):29-32.

[2] 邹方, 薛汉杰, 周万勇. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展. 航空制造技术, 2006(9):30-35. (责编 良辰)