

# 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用

## Application of Digital Measuring System in Aircraft Assembly

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 邹爱丽 王亮 李东升 张俐  
中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 郭洪杰

**[摘要]** 数字化测量技术及系统是现代飞机数字化装配技术的重要组成部分。现代飞机装配中通过应用数字化测量技术及系统,不仅保证了飞机装配准确度、提高了生产效率,同时实现了飞机产品从零件设计制造到装配过程的全数字量传递。本文详细研究了当前在飞机装配中应用广泛的几种数字化测量系统:激光跟踪仪测量系统、三维激光扫描测量系统、数字照相测量系统以及室内GPS系统,阐述了各系统的工作原理及特点,并对其在飞机装配中的应用进行了论述。根据国内发展数字化装配技术的需要,对数字化测量技术及系统的应用前景进行了展望。

关键词: 数字化 测量 飞机装配

**[ABSTRACT]** Digital measurement technology and system are the important component of modern digital technology in aircraft assembly, which is applied in the assembly process of modern aircraft, not only ensure the accuracy of aircraft assembly, but improve the production efficiency, the full digital transmission is achieved from part design and manufacture to assembly process of aircraft products simultaneously. Several digital measurement systems are studied, which are widely used in aircraft assembly currently including laser tracker measurement system, three-dimensional laser scanning system, digital camera measurement system and indoor GPS system, the working principle and characteristics of the system are described and its application in aircraft assembly is discussed. According to the requirement of developing the digital assembly technology in the domestic, the application of digital measurement technology and system is prospect

**Keywords:** Digitization Measurement Aircraft assembly

飞机制造是一项复杂的系统工程,其最终产品的装配精度决定了飞机是否能够达到设计要求。因此,飞机

装配过程中以及装配完成后的测量检验非常重要。

在传统的飞机制造中,主要采用基于模拟量传递的互换协调体系,测量和检验主要是利用样板、标准样件等工具来实现<sup>[1]</sup>。传统的测量检验方法在早期的飞机制造中发挥了重要作用,但现代飞机高可靠性、长寿命(新一代军机要求飞行6000s以上,大型客机飞行60000~80000s)的需求,对飞机的装配精度、装配质量提出了更高的要求,传统的检测方法在准确度和效率上已无法满足现代飞机装配测量的需求。

随着数字化技术在飞机制造中的应用,先进的数字化测量技术及系统开始应用于飞机制造装配中,并取得了很好的效果。数字化测量技术已成为现代飞机数字化装配技术的重要组成部分,是实现现代飞机制造全数字量传递的重要保证之一。

国外先进的飞机制造公司通过应用数字化测量技术,大幅度提高了测量准确度和测量效率,进而提高了飞机的装配精度和装配质量。国内对数字化测量技术及系统的应用还处于初级阶段,缺乏对各种数字化测量技术及系统的应用和深入研究。因此,了解各种数字化测量技术及系统的原理及功能,掌握其特点,对促进国内数字化测量技术在飞机装配过程中的深入应用具有重要的指导意义。

### 1 数字化测量技术的特点和优势

数字化测量检测技术是指利用数字化的测量设备(如激光跟踪仪、iGPS、测量照相机、雷达扫描仪、电子经纬仪等),根据飞机产品的数字化模型定义,在计算机的控制下完成飞机装配中关键特征的自动、快速、精密的测量并对其数据进行处理的过程中所涉及的所有相关技术的总称。表1为当前飞机装配中应用的各种数字化测量设备。

数字化测量技术的作用和优势包括<sup>[2]</sup>:

(1) 具备可进行大型测量工件的能力。对当今飞机尺寸不断变化的情况更具价值。

(2) 与传统的测量手段相比,数字化测量系统虽然复杂、昂贵,但其应用范围广、使用周期长,因此,从整个

表1 飞机装配中常用的数字化测量设备

名称	特点
激光跟踪仪	体积小,可单台工作;激光稳定;精度可达5ppm
室内GPS	大量接收器和发射器;适于大空间工作区域;精度最高达0.2mm
测量照相机	可变换地点和角度;依赖分析软件;多台设备
全站仪	受温度和气压影响大;精度最高5mm
电子经纬仪	两台以上配合使用;精度取决于标尺;精度随条件变化

周期成本计算,反而会节约成本。

(3)能够简化工装,使之更具通用性和柔性。

(4)能完成更加复杂的形位测量任务。数字化测量系统具备的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和控制。

(5)能够进行离线测量标定,或者通过网络进行异地并行工作。

(6)数字化测量系统可以与机电控制系统、机械随动装置等组成一套完整的数字化装配体系,根据测量分析结论通过计算机发出运动的指令,从而容易实现对机电结构运动的控制。

## 2 飞机装配中应用的典型数字化测量系统

当前存在的数字化测量系统种类很多,在飞机装配中应用较为广泛的主要有以下四种:激光跟踪测量系统、三维激光扫描测量系统、数字照相测量系统以及iGPS系统。

### 2.1 激光跟踪仪测量系统

激光跟踪仪测量系统一般由激光跟踪头(内部有一套激光干涉仪、两套角度编码器、电机以及光电接收器件等)、控制器、用户计算机、反射器及测量附件等组成<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.1 测量原理

激光跟踪仪是基于球坐标系的空坐标测量机,可实现目标的静态坐标测量和动态轨迹跟踪。激光跟踪仪测量原理如图1所示,即通过测量一个长度和两个角度(一个方位角、一个高度角)来确定被测点的三维坐标<sup>[4]</sup>:设跟踪器的旋转中心和被测靶镜的中心分别为O点和P点。两个角度编码器可分别测量出P点的水平方位角 $\alpha$ 和垂直方位角 $\beta$ ,激光干涉仪可测得O点到P点的距离D,那么P点坐标(X, Y, Z)可由下列公式计算得出:

$$\begin{cases} X = D\sin\alpha\cos\beta \\ Y = D\cos\alpha\cos\beta \\ Z = D\sin\beta \end{cases} \quad (1)$$

#### 2.1.2 测量特点

激光跟踪测量系统是工业测量系统中一种高精度大尺寸的测量仪器,具有高精度、高效率、实时跟踪测量、安装快捷、操作简便等特点,适合于大尺寸工件装配测量。但激光跟踪仪受温度及气压影响较大,且测距为相对测距,在跟踪过程中要保持激光束不能丢失,另外测距需要合作目标(反射器)配合,是一种接触式的测量系统。

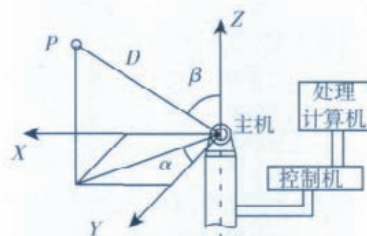


图1 激光跟踪仪测量原理图

Fig.1 Diagram of laser tracker measurement

#### 2.1.3 在飞机装配中的应用

激光跟踪仪测量系统是当前飞机制造过程中应用最为广泛的一种数字化测量系统。在飞机的外形测量、飞机装配过程中的零部件定位;对接过程中的工装调整等方面均已得到应用。

在波音公司的X32装配过程中,利用4台Zeiss激光跟踪仪对部件进行空间定位,完成了大部件对接装配工作<sup>[5]</sup>。洛克希德·马丁公司在F35装配中,采用了AIT公司开发的EMAS(Electronic Mate and Assembly System)对接装配系统,实现了F35的精确对接装配。在EMAS中,激光跟踪测量技术是其中的关键。此外,空客公司在A380、A400M的部件装配、对接中均采用了激光跟踪测量技术。

### 2.2 三维激光扫描测量系统

三维激光扫描测量系统由扫描仪箱、脚架组件(脚架推车、脚架箱)、交/直流电源箱、计算机及软件、电缆线等组成。三维激光扫描测量系统受温度影响较小,对环境要求不高,在日光照射及全黑暗环境中均可使用。

#### 2.2.1 测量原理

三维激光扫描测量与三坐标测量仪、经纬仪、全站仪、激光跟踪仪等的点测量设备不同,它是通过对所确定目标的整体或局部进行完整的三维坐标数据扫描测量,进而得到完整、全面、连续的全景点坐标数据<sup>[6]</sup>。

#### 2.2.2 测量特点

三维激光扫描系统实现了非接触性坐标测量,在人员难以进入的地带有明显优势,且能够以高分辨率快速获得高密度点云数据,亦可直接采集目标的结构及表面属性。缺点是测量精度较其他几种数字化测量系统要低<sup>[7]</sup>。

## 2.2.3 在飞机装配中的应用

三维激光扫描技术在应用中不需要让点云中的每个点都定位精确,只需让点云所描述的整体及空间的构成得到高精度的三维实体重构。因此,三维激光扫描技术主要用于飞机蒙皮接缝宽度、阶差等装配质量的现场快速检查。

美国波音公司在飞机舱门装配中,应用三维激光扫描进行测量检验。

## 2.3 数字照相测量系统

数字照相测量系统主要由手持式数码相机、一体化计算机、PCMCIA 接口组成。

### 2.3.1 测量原理

数字照相测量系统利用结构光技术、相位测量技术、计算机视觉技术对目标进行多次多角度照相,以获得数字图像信息,从而依据三角测量原理,解算出点云空间坐标。

数字照相测量系统的测量原理如图 2 所示,其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为照相机  $M_1$  和  $M_2$  观测目标点  $P$  的水平角;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为照相机  $M_1$  和  $M_2$  观测目标点  $P$  的垂直角;  $\beta_{12}$  为  $M_1$  和  $M_2$  之间的垂直角;  $d$  为  $M_1$  和  $M_2$  的水平距离。目标点  $P$  的空间坐标计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} x = \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} d \\ y = \frac{\sin \alpha_2 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} d \\ z = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin \alpha_2 \tan \beta_1 + \sin \alpha_1 \tan \beta_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + 2 \tan \beta_{12} \right] d \end{cases}, (2)$$

为了提高经济性,在实际应用中,对于静态目标脱机测量系统可以采用单台数码相机,在两个或多个位置对被测物进行照像,再利用电脑对所得图像进行处理,从而得到被测物三维坐标,数字照相系统应用原理如图 3 所示。

### 2.3.2 测量特点

数字照相测量系统操作简单、携带方便,并且可以在不稳定的环境中进行测量,特别适合动态物体的快速坐标测量。

### 2.3.3 在飞机装配中的应用

由于数字化照相测量系统对现场光线及测量对象材质比较敏感,在测量范围较大时误差较大,效率低,因此,其不适合大型部件整体装配精度的评估,但其可用于特定情况:如通过快速图像识别技术进行飞机蒙皮铆接铆钉数目检测,或使用摄影测量技术检测细节尺寸;也可用于飞机蒙皮及典型型面的检测<sup>[9]</sup>。

在空客 A380 机身段装配及机身舱门的装配过程中,就应用了数字化照相测量技术。

## 2.4 室内 GPS (iGPS) 测量系统

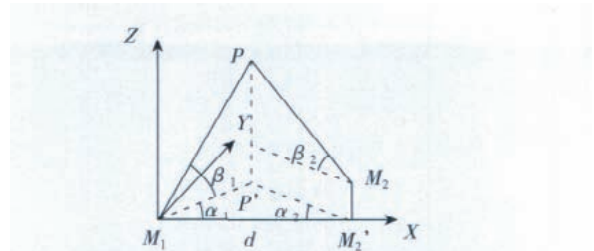


图2 数字照相系统的测量原理图

Fig.2 Measurement diagram of digital photogrammetry

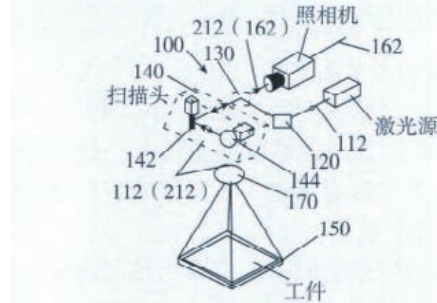


图3 数字照相测量应用原理

Fig.3 Application principle of digital photogrammetry

iGPS 测量系统是根据 GPS 的测量原理,基于区域 GPS 技术而开发的一种具有高精度、高可靠性和高效率的测量系统。系统由若干个红外激光脉冲发射器、传感器、接收机、计算机及网络分析软件等部分组成。

### 2.4.1 测量原理

iGPS 系统主要利用三边测量原理建立三维坐标系来进行测量,三边测量原理如图 4 所示。利用传感器接收空间分布的红外发射器产生的信号,用接收机转换为角度和位置信息,从而得到被测物的当前位置。

由于在三边法测量系统中,无需进行角度测量,其精度取决于距离测量的精度和测点的图形因子系数 (GDOP 值),因此, iGPS 坐标测量更具优越性。

### 2.4.2 测量特点

iGPS 系统能建立一个大的空间坐标系,所有的测量任务(如坐标测量、跟踪测量、准直定位、监视装配等)都可在此坐标系下完成,因此, iGPS 无需建站即可

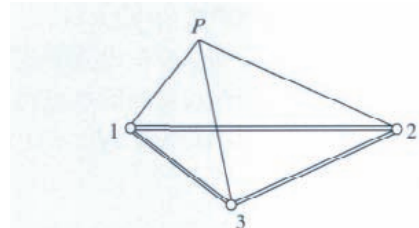


图4 三边测量系统原理图

Fig.4 Diagram of trilateration system

测量超大尺寸对象,而且支持同时多用户测量,不受温度影响。虽然其测量精度相对不高,但测量值较为稳定(在测量误差达到一定值后就不再随着测量范围的增大而增大)<sup>[10]</sup>。因此,在全域测量时,iGPS 优于激光跟踪仪。

### 2.4.3 iGPS 在飞机装配中的应用

美国波音公司从 1998 年开始研究 iGPS 测量技术,在波音 747、F/A18、波音 777 等飞机的总装对接中,都应用了 iGPS 技术。而在最新的波音 787 部件对接中,iGPS 技术的应用更加成熟,实现了波音 787 的精确对接装配<sup>[11]</sup>。图 5 为 iGPS 在波音 787 飞机对接中的应用。

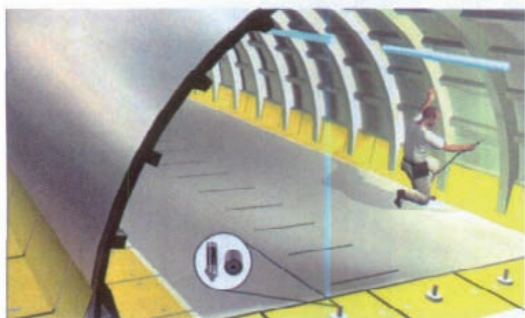


图5 iGPS在波音787飞机对接中的应用  
Fig.5 Application of iGPS in Boeing 787

## 3 数字化测量系统在国内应用展望

随着飞机数字化柔性装配理念在国内的日益深入,国内展开应用数字化柔性装配技术是大势所趋。而作为数字化柔性装配技术的重要组成部分,数字化测量技术和系统必将得到更广泛的应用。

当前国内各主机厂已经引进了多台激光跟踪测量设备以及其他一些先进数字化测量设备,但这些数字化测量设备主要用在工装的安装和检验中,缺乏在飞机制造装配中更广泛、更深入的应用。随着国内柔性工装技术的发展应用,如何利用柔性工装结合数字化测量系统完成飞机的精确装配,成为当前国内亟需解决的关键问题。

图 6 所示为某型飞机某机身段结构装配方案。该段飞机在装配中,首先利用工装定位四个加强框,此处工装为柔性工装;然后以加强框为基准装配其余辅助构件。因此,在实际装配中,柔性工装的校准、装配中加强框位置的保证以及装配完成后产品的检验,都需要采用数字化测量技术及系统来实现。

可见,数字化技术和系统在国内飞机装配中的深入应用是必然趋势,其在国内的应用具有广泛的前景。

## 4 结束语

现代飞机装配中,通过综合应用各种数字化测量技

术和系统,大幅度提升了飞机的装配效率和装配质量,促进了飞机装配技术的发展。

随着国内对飞机数字化装配技术的日益重视,和数字化装配工艺仿真技术、柔性工装技术、先进连接技术等其他各项相关技术的日益成熟,国内在飞机装配中对

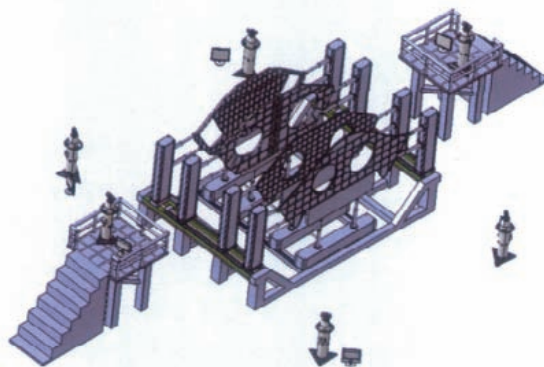


图6 某型飞机某段数字化装配方案  
Fig.6 Digital assembly program of a certain type of aircraft

数字化测量技术的应用提出了更高的要求。

因此,根据各种数字化测量技术及系统的特点及优势,立足于各主机厂实际情况,深入开展数字化测量技术及系统的应用研究,形成相应的工艺标准和规范,充分发挥数字化测量系统的优势,对提高国内飞机制造水平,增强核心竞争力,具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] 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.
- [3] 李广云. LTD500 激光跟踪测量系统原理及应用. 测绘工程, 2001, 12 (4):3-8.
- [4] 李广云. 非正交系坐标测量系统原理及进展. 测绘工程学报, 2003:4-10.
- [5] 任晓华. 新型飞机自动化装配技术. 航空制造技术, 2005 (12): 32-35.
- [6] 毛方儒,王磊. 三维激光扫描测量技术. 宇航计测技术, 2005(25):1-6.
- [7] 李鹏,张文兵,李静. 三维激光扫描测量技术. 科技信息, 2009(31):833-834.
- [8] 周莹. 基于激光跟踪测量系统的研究及其在管片检测中的应用[D]. 上海:同济大学,2007.
- [9] 李沈泉,黄翔,方伟,等. 飞机装配中的数字化测量系统. 航空制造技术,2010(23):46-48.
- [10] 吴晓峰,张国雄. 室内 GPS 测量系统及其在飞机装配中的应用. 航空精密制造技术, 2006,42(5):1-5.
- [11] 于勇. 波音 787 飞机装配技术及其装配过程. 航空制造技术, 2009 (14):44-47.

(责编 三丰)