

飞机装配过程数字化测量技术*

张开富

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

[摘要] 自 20 世纪以来,飞机装配过程中的测量检测技术经历了从“定性检测、事后检验”到“定量测量、实时跟踪”的转变。随着飞机装配向智能化迈进,数字化测量技术已经成为飞机装配过程的重要因素,并不断向“智能测量、反馈控制”的目标发展。本文首先回顾了飞机装配过程中测量检测方法从模拟量到数字量演变的 4 个阶段。随后,根据数字化测量技术的基本原理和测量目标,从点位坐标测量、形状特征测量和曲面外形测量 3 大类对当前飞机产品装配过程中主要应用的数字化测量技术进行了归纳总结。

关键词: 数字化测量; 飞机装配; 智能装配

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.10.034



张开富

教授,博士生导师,西北工业大学科学技术管理部副部长兼高新技术处处长。主要从事先进装配与连接、结构损伤与疲劳等领域研究。近 5 年,主持国家自然科学基金项目 2 项,主持国家科技支撑计划、总装预研基金、航空科学基金项目 10 余项,获陕西省科学技术一等奖 1 项、二等奖 3 项,主持与大型飞机等型号技术攻关项目 10 余项;发表学术论文近 50 篇,其中 SCI 收录 20 篇、EI 收录 40 余篇;申请国家发明专利 10 项,授权发明专利 4 项。

* 基金项目: 高档数控机床与基础制造装备重大专项(N2014KF0085)。

近年来,伴随着信息技术、网络技术、自动化技术、人工智能技术等先进技术的蓬勃发展,全球制造业正迎来一次深刻的产业变革机遇。在“工业 4.0”、“先进制造业伙伴计划”和“中国制造 2025”等一批国家战略规划中,纷纷将发展智能制造列为核心与焦点。

飞机制造业作为制造业技术密集型的尖端行业,也面临着生产方式的深刻变革,构建数字化、信息化、网络化、自动化深度融合的智能制造体系既是长远的发展目标,也是当前的迫切需求。

对于飞机装配过程而言,数字化测量技术可以实现对飞机产品装配要素信息的精确采集,确保装配过程状态信息的实时获取,是智能制造体系中实现飞机装配物理状态与信息网络之间互联互通的支撑性关键技术。随着飞机装配过程向智能化迈进,数字化测量技术已经成为促进飞机智能化装配快速发展的关键因素和重要力量,并不断向“智能测量、反

馈控制”的目标发展。

飞机装配过程测量方法发展历程

1 模拟量传递下装配定性测量技术阶段

飞机外形是复杂曲面,并且协调准确度要求高。在我国飞机制造业的早期阶段,为了满足生产工装间协调性和零件、装配件及部件的互换性,在制造过程中采用传统模线样板(局部)标准样件协调方法,通过模线、样板和标准样件等实体模拟量传递产品的形状和尺寸。

在这过程中,模线是飞机外形和结构形状的原始依据,而外形样板、内形样板、展开样板、切面样板等平面样板就是加工或检验各种工艺装备及测量工件外形的量具。标准量规、外形标准样件等标准工艺装备也被大量使用,以作为制造和检验生产工艺装备外形和尺寸的依据,进一步保障飞机产品的制造准确度和协调准确度^[1]。此外,飞机产品装配型架

的安装和检验工作也经历了由标准样件、型架装配机、光学仪器(准直望远镜、光学直角头和坐标经纬仪等)到激光准直仪的发展历程。

然而,以模拟量为依据的飞机制造体系存在手工劳动比重大、生产准备周期长、制造费用大、尺寸链环节多、路线长等缺点,飞机产品的制造准确度难以提升。随着计算机和数控技术的发展,数字量的传递体系直接推动了飞机制造业的技术变革,传统模拟量的测量检测手段已无法满足日益提升的飞机装配质量要求。

2 数字化装配测量检验技术阶段

从20世纪80年代开始,国际航空公司开始采用计算机辅助电子经纬仪、三坐标测量机、激光跟踪仪、激光雷达等精度高、范围大、柔性好的数字化测量设备,并采用关键特征点检测方法,取代传统的基于模拟量的形位检测方法^[2]。

在国内,各大主机厂也开始逐步引进各类数字化测量设备。1996年,沈飞集团在国内第一次引进了激光跟踪测量系统^[3]。随后,中航工业西飞在波音737-700平尾转包生产项目中,广泛使用计算机辅助技术,并在装配型架组装、工装精度检测和大型复杂零件测量检验等环节采用了激光跟踪仪和计算机辅助经纬仪^[4]。

与此同时,三坐标测量机已在我国航空工业获得广泛应用,主要配置在模具、样板、壁板、肋板、叶盘等各类飞机构件加工后的检测工作中^[5]。

各类高精度、自动化、数字化测量系统的装备使用,直接改善了我国传统的飞机制造工艺装备的协调方法,缩短协调路线和生产准备周期。在该阶段,各类数字化测量设备的应用领域主要集中在以下3个方面^[6]:

(1)检测数控加工零件的曲面外形,保证加工精度;

(2)测量产品实际外形、位置等数据信息,通过与数学模型的对比进行拟合分析,判断产品实际偏差状

态,检测产品是否合格;

(3)通过三坐标测量机,采集产品曲面外形的型值点,据此建立数学模型,并生成数控加工指令,控制零部件的加工过程。

3 数字化装配过程测量与控制技术阶段

近些年来,波音、空客、洛克希德·马丁、罗尔斯·罗伊斯等国外航空公司已经普遍采用基于数字化测量设备的产品三维检测与质量控制手段,开发并形成了飞机产品三维测量规划与数据分析体系,制定了数字化三维检测技术规范,形成了完整的数字化测量技术体系。先进测量技术的应用已由关键零部件的离线检测发展到贯穿于制造和装配的检测过程控制和故障维护等全过程的在线自动化测量,并发展出了全新的、高效率的制造流程和工艺规范,将数字化测量与反馈系统充分融入到零部件制造过程监控与补偿、柔性自动化装配定位和飞机产品质量控制等环节,直接推动了飞机产品质量和性能的大幅度提升^[7]。

与此同时,国内各飞机制造企业已经广泛使用各类数字化测量设备,从装配坐标系的设计建立、工装夹具的安装检验、零部件的检测定位、组部件的调姿分析,到整机装配的检测评估,数字化测量贯穿飞机装配过程的始终,并逐步尝试跳出单个测量系统封闭独立的信息孤岛状态,构建多种测量系统优势互补、数据融合的多源测量场,实现三维数字信息与装配过程的互联互通,辅助装配过程自动化完成^[8]。

4 智能装配技术发展给测量技术发展带来的变革

飞机装配技术经历了从手工装配、半机械/半自动化装配、机械/自动化装配到柔性化装配的发展历程,正在向智能化装配方向迈进^[9]。相应地,飞机装配过程的测量检测技术,也经历了由模拟量到数字量的深刻

变革。在模拟量协调体系阶段,飞机装配过程的测量检测可以概括为“定性检测、事后检验”,采用仪器、量具和检具等对一个工艺步骤结束后的产品进行合格性判断,对具体的尺寸量可以不关心^[10]。当飞机装配进入机械化、自动化、柔性化的时代后,一方面受到飞机产品日益提升的质量和性能要求的影响;另一方面得到飞速发展的测量技术的有力支撑,以数字量为基准的先进测量技术在飞机装配中的应用领域逐步扩大,实现了“定量测量、实时跟踪”的技术转变,充分保障了飞机装配过程中零部件加工的准确性、产品定位的精确性和装配的协调性等各项关键因素。

随着信息技术、自动化技术和测量技术的日新月异,数字化测量设备不断推陈出新,精度、稳定性、通用性等测量性能不断提高,极大地拓展了数字化测量技术在飞机装配领域的应用。其测量对象覆盖了从零件级、部件级到整机级的大跨度尺寸范围,满足了精准定位、外形检测、调姿对接、质量评估等多种多样的测量需求。然而,受限于基本的测量原理及精度要求,各类数字化测量设备擅长领域各不相同,本文根据最优的测量目标,将目前航空制造企业广泛装备的数字化测量设备分为点位坐标测量、形状特征测量和曲面外形测量3大类。

飞机装配点位坐标测量技术

点位坐标即飞机设计坐标系下某个点的空间位置信息,是飞机装配过程中工装、零部件定位的依据,其准确度直接影响飞机装配质量。点位坐标测量,通过各种先进的数字化测量设备,测量目标物体上的靶点的位置,为后续的定位和检测工作提供数据支持。点位坐标测量技术在零部件定位、工装调整以及装配检测等过程中具有重要的作用,目前应用于飞机装配过程中的数字化点位测量

技术主要包括激光雷达、激光跟踪测量和空间定位测量等。

1 激光雷达测量技术

激光雷达是20世纪80年代末兴起的非接触测量设备,在雷达技术的基础上结合了激光技术,使工作波段扩展到红外光、可见光和紫外光。激光雷达测量系统的实质是一个采用球坐标系测量系统的非相干、连续波激光测距机。测量时,仪器向被测目标投射激光束,并根据反射回的光线计算出目标点的空间位置。激光雷达设备工作时,红外激光器将同时发射两束激光,一束投射向被测目标,另一束投射到内部校准光纤。通过比较两束激光间的频率差,即可得到两束激光的时间差,如图1所示。再如图2所示,红外激光器与目标点间的绝对距离可以通过时间与距离的关系计算得到^[11]。球坐标系中目标点的仰角和方位角分别由激光雷达系统的旋转头和反射镜获得,最后通过直角坐标转换,计算得到被测目标点的空间三维坐标。

激光雷达测量系统的测量精度比较高,无需靶标系统,其10m范围内测量精度在0.1mm左右^[12],并在国际航空制造企业中有了成熟的应用,例如,波音787机身段、起落架舱门和机翼蒙皮切割,以及空客A380机翼、机身段、机翼根部、钣金件、发动

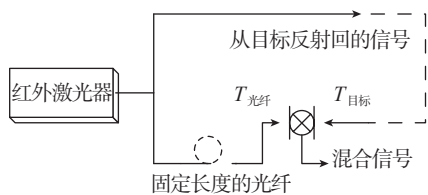


图1 激光雷达测距原理

Fig.1 Principle of laser radar

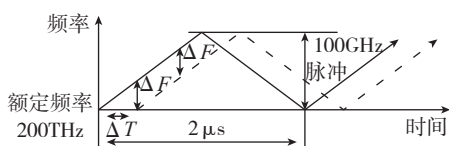


图2 时间差与频率差关系

Fig.2 Relationship of time and frequency difference

机进气罩等大尺寸飞机部件的装配测量^[13]。

2 激光跟踪测量技术

激光跟踪测量系统是当前国内使用最为广泛的先进测量设备。与激光雷达相似的,激光跟踪测量技术也是测量被测目标点的绝对距离、水平方位角和垂直方位角的球坐标测量系统,其中,角度编码器负责测量两个方位角,激光干涉仪测量距离分量^[14]。通过反射靶标装置,激光跟踪测量系统可静态或动态地跟踪一个空间点位,测量得到球坐标系中的3个位置分量 α 、 β 、 r ,并由此计算目标点在直角坐标系中的位置矢量 $P=(x,y,z)$,如图3所示。其中:

$$\begin{cases} x = OP \sin \beta \cos \alpha \\ y = OP \sin \beta \sin \alpha \\ z = OP \cos \beta \end{cases}$$

反射靶球相对跟踪仪的水平方位角 α 和垂直方位角 β 分别由两个角编码器计算得到,空间绝对距离 OP 由激光干涉仪测量得到,射出与返回激光间的干涉信号经整形、放大后计算总脉冲数,再根据公式计算出空间距离。

洛克希德·马丁公司在F-35装配中,采用了以激光跟踪测量技术为核心的对接装配系统(Electronic Mate and Assembly System, EMAS),实现了F-35的精确对接装配;此外,空客公

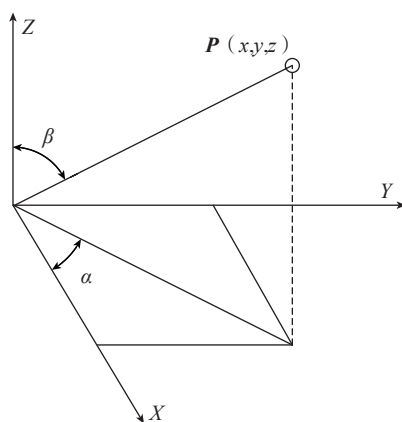


图3 激光跟踪测量技术原理

Fig.3 Principle of laser tracking measuring

司在A380、A400M的部件装配、对接中均采用了激光跟踪测量技术^[15]。

3 空间定位测量技术

空间定位测量技术的原理和GPS全球定位系统一样,但是采用红外激光代替卫星系统的微波信号,多个相互独立的接收器在接收到两个以上发射器的红外光信号后,即可以计算出每个接收器的空间位置。空间定位测量系统工作时,发射器在高速旋转的过程中,投射出两个呈一定角度的激光平面。根据接收器所能接收到的激光信号,系统能够对接收器所处空间点位的水平方位角和垂直方位角进行测量计算,如图4所示。当系统中存在多个发射器时,即可计算出每个接受器的空间位置。测量一个点所需要的最少发射器数量是2个,发射器越多,测量越精确^[16]。实际装配过程中,激光发射器发出的脉冲激光覆盖整个工作区域,工作区域的每一位置点均将置于激光覆盖区域内部,空间定位测量系统能够对这些点进行实时检测。

波音、空客、洛克希德·马丁等国外航空航天制造企业较早地开展了空间定位测量系统在柔性装配型架安装、大型部件精确定位以及自动钻铆机末端执行器位置标定等过程中的应用研究。在波音公司的B747、B787,空客公司的A380等机型总装对接中,均应用到了空间定位测量系统。该类测量技术还已应用于自动钻铆、焊接等机器人运动的实时定位跟踪,装配车间自动牵引运输车(AGV)的路径导航,以保证大空间全

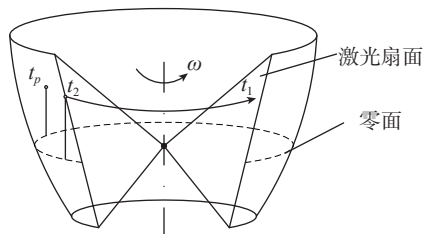


图4 空间定位测量系统工作原理

Fig.4 Work principle of space position measurement system

传感器的测量原理是激光三角测量方法,最高线性度可达 $1\mu\text{m}$,分辨率更是可达到 $0.1\mu\text{m}$ 的水平。飞机装配中,将电涡流/激光测距传感器分布在末端执行器端面,通过测量的距离计算加工坐标系与工件坐标系间的角度偏差,一般利用三点和四点调平算法实现执行器的法向调平,修正制造、协调、变形等误差累积引起的加工点曲面理论法线与实际法线间的偏差。

在机翼自动钻铆系统中,利用机翼表面上待钻铆点附近3点 P_1 、 P_2 和 P_3 坐标来表征该区域的空间姿态。通过安装在钻铆机动力头上3个电涡流传感器测量探头到钻铆区域的距离,拟合平面 $P_1P_2P_3$ 方程并计算平面法向量,经坐标变化得到钻铆机控制参数,如图6(a)^[19]。在机器人自动制孔系统中,传感器在被测表面上的投影分别为 A 、 B 、 C 、 D ,其中任意3点不共线,在加工点周围构成了4个微平面,计算每个微平面在压力坐标系下的法向量,加权平均4个法向量得到加工点 M 的法向量,如图6(b)^[20]。由于位移传感器缺乏定位基准,较难保证传感器间的高度相同、轴向平行的安装要求,故需对安装后传感器零点和测量方向进行标定^[21]。

3 关节臂三坐标装配定位测量技术

基于角坐标系的笛卡尔式三坐标测量机依靠3个相互正交的直线导轨的独立移动来实现测量头在空间内的无死角运动,测量结果通过3个方向的直线位移量直接获得。而

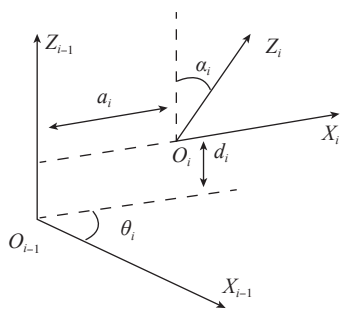


图7 D-H变换示意图

Fig.7 Sketch map of D-H changing

关节臂式三坐标测量系统是一种基于旋转关节和转动臂的三坐标测量系统,以角度测量基准取代了长度测量基准,属于多自由度非笛卡尔式坐标测量系统,由多个关节臂、测量头、平衡块、计算机等部分组成。此外,在臂上贴有测温元件,而且每条臂上靠近末端的地方对称贴有4个平行于臂轴方向的应变片,以对温度和弯曲变形进行补偿^[22-23]。D-H矩阵方法可求解两个连接且可以相互运动的构件间的坐标转换问题,关节臂通过级与级之间的正交连接组成,通过逐级的坐标变换,计算出测头中线坐标,如图7所示。

飞机装配中壁板边缘往往留有一定余量,需要自动铣边设备切除余量获取最终轮廓,测量边缘轮廓线是确定切削余量和切削路径的关键。笛卡尔式三坐标测量机要求被测物体位于设备内部,飞机壁板具有大尺寸特点且需要特定工装装夹,该类测量设备并不适用。而关节臂式三坐标设备具有量程大、体积小及使用灵活等优点,与移动平台配合使用,能适用于大尺寸飞机壁板的边缘轮廓线的测量。

飞机曲面外形测量技术

飞机产品外形以曲面为主,曲面外形准确度是保证飞机气动性能

和隐身性等功能的关键,曲面外形的测量检测一直是飞机部件、大部件装配关注的重点。飞机产品曲面的类型复杂多变且尺寸跨度大,属于典型的空大尺寸测量问题。通过照相测量技术、激光扫描测量技术等先进测量方法,快速获得飞机曲面外形信息,并与三维设计模型建立匹配,实现飞机产品装配外形精准分析,对于提升飞机装配质量具有重要意义。

1 外形照相测量技术

外形照相测量技术的主要原理为摄影测量图像处理技术,基于空间交汇三角测量原理,可实现同时处理计算大量测量目标点的空间位置信息,适于大尺寸曲面外形数据的便捷测量。该技术通过特制的反射标记将被测对象准二值目标化,再通过一台或多台专用相机对被测对象进行多方位拍照,经计算机软件对拍摄的照片进行处理,可以解算出拍摄相机在不同位置时的空间位置和姿态关系,以及反射标记点的三维坐标。如图8所示,设测量点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 处有 j 个摄站(j 条光线)相交, S_i 为不同的摄影站位,则共有 j 个共线方程^[24]。对每个摄站而言, x_{0j} 、 y_{0j} 、 f_j 、 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 称为像片的内方位元素,用来确定确定投影中心在像空间坐标系中对像片的相对位置; X_{sj} 、 Y_{sj} 、 Z_{sj} 、 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} ($i=1,2,3$) 为像片的外方位元素的平移量及旋转

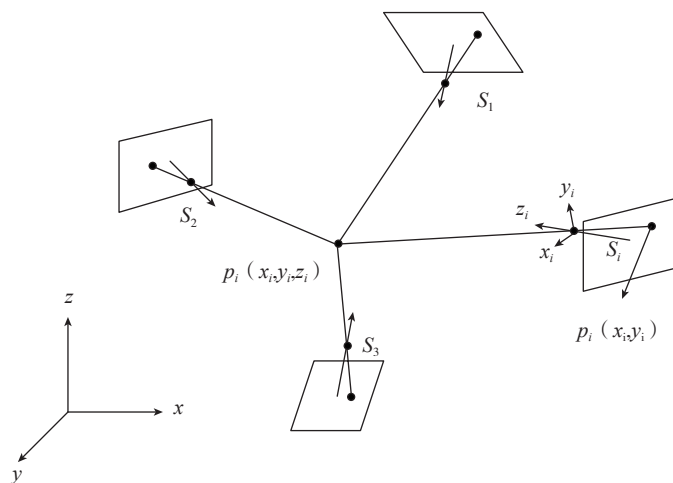


图8 照相测量基本原理

Fig.8 Principle of camera measurement

阵的元素,用来确定一张像片和投影中心在物方坐标系中的方位。根据基于光线束平差算法,结合最小二乘原理,将多个光线束的共线方程联立求解,即可以获得目标点的空间坐标 (X, Y, Z) 。

$$\begin{cases} x_{ij} - x_{0j} + \Delta x_{ij} \\ = -f_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{sj}) + b_{1j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{1j}(Z_i - Z_{sj})}{a_{3j}(X_i - X_{sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{sj})} \\ y_{ij} - y_{0j} + \Delta y_{ij} \\ = -f_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{sj}) + b_{2j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{2j}(Z_i - Z_{sj})}{a_{3j}(X_i - X_{sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{sj})} \end{cases}$$

该测量方式具有易于携带和移动,适合大尺寸测量,受温度、振动等环境影响小,精度高等优点。照相测量技术已成功应用于波音公司737-800的整机外形检测和空客公司A380机身对接面装配准确度检测。

2 外形激光扫描测量技术

激光扫描测量系统通过对目标对象进行高精度步进测量,获得测量对象局部或整体的大量三维坐标数据,即“点云”。该技术能实现大面积密集点的快速测量,与激光跟踪测量系统相比,不需要靶标或手持扫描装置即可实现对被测目标的测量。激光扫描系统主要由激光测距系统、控制系统、扫描系统和电源系统组成,还可以根据需要集成内部校正系统^[25]。根据测距原理,可将其分为脉冲法激光测距、激光相位法测距和激光三角法测距3类。

脉冲测距法根据测量脉冲信号的发射和接收时间差计算发射点与目标的距离。相位法测距则需要对激光束的幅值进行调制,通过测量被调制的光信号在测量往返传播过程中产生的相位差,间接获得激光束在被测距离上传播的时间,计算得出被测距离。三角法借助三角形几何关系,建立激光发射点、CCD接收点和目标反射点的空间三角形,根据两个反射角和基线长度,计算出目标的三维坐标。激光扫描测量系统可以与CAD及配套分析软件平台集成,完成测量曲面的分析等工作。激光扫描

测量系统已在空客公司A380机翼装配外形检测工作中得到了成功的应用。

数字化测量技术展望

伴随着飞机装配技术的不断革新,测量技术也经历了从模拟量到数字量的变革,由“定性检测、事后检验”转变为“定量测量、实时跟踪”,彻底贯通了飞机产品从模型设计开始,经历零件制造,直到部件装配的数字量传递渠道,形成了连续的数据信息转化过程,成为飞机数字化装配关键支撑技术。但当智能制造时代来临之际,数字化测量技术有了更高层次的要求——“智能测量、反馈控制”。

围绕“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能制造基本框架,数字化测量技术需要满足对各类装配状态要素的精确采集和实时获取,实现从飞机装配物理状态到制造信息网络的信息转化功能。因此,需要突破现有测量技术、装备和理念的束缚,探索各类状态监测传感器、RFID、条形码、物联网、泛在网等技术,拓展数字化测量技术的概念范围,建立可覆盖飞机装配全部物料资源和装配活动全过程的数字化测量与监控网络,实时感知、监控、分析飞机装配状态,使数字测量技术真正成为飞机智能装配体系中的“神经末梢”^[26],并进一步建立与制造执行系统的信息反馈控制渠道,将数据分析中心产生的装配决策传递至执行单元,构成完整的智能制造数据流闭环反馈控制体系。

参考文献

- [1] 王海宇. 飞机装配工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- [2] 陈博. 飞机钣金件外形数字化检测系统研发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [3] CHEN Bo. Research on digital detection

technology for the shape of aircraft sheet metal parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[3] 李广云. LTD500激光跟踪测量系统原理及应用[J]. 测绘工程, 2001, 10(4):3-8.

LI Guangyun. The principle and application of the LTD500 laser tracker system[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2001, 10(4): 3-8.

[4] 黄侠. 应用计算机辅助技术制造波音737-700垂尾[J]. 航空工程与维修, 1999(4):16-19.

HUANG Xia. Application of computer aided manufacturing technique in subcontracting B737-700 vertical tail [J]. Aviation Engineering. 1999(4): 16-19.

[5] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

FAN Yuqing. Modern aircraft manufacturing technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2001.

[6] 蔡闻峰. 面向某型无人机的数字化测量技术的研究与应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

CAI Wenfeng. The study and application of digital measuring technology for XX UAV [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[7] 冯子明. 基于三维模型的飞机数字化快速检测技术研究[J]. 航空制造技术, 2011(21): 32-25.

FENG Ziming. Research on digital and rapid inspection technology based on 3D model for aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(21): 32-35.

[8] 李光丽, 邹方, 卜泳. 贯穿柔性装配的数字量主线——数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2014(23):60-62.

LI Guangli, ZOU Fang, BU Yong. Digital measurement technology for flexible assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(23): 60-62.

[9] 姚彬彬, 邹方, 刘华东. 飞机智能装配技术[J]. 航空制造技术, 2014(23):57-59.

YAO Yanbin, ZOU Fang, LIU Huadong. Intelligent assembly technology of aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(23):57-59.

[10] 韩志仁. 大飞机数字化制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2016(1/2):53-57.

HAN Zhiren. The key technology for the digital manufacturing of large aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1/2):53-57.

[11] 林雪竹. 大飞机数字化水平测量系

统及关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.

LIN Xuezhu. Research on the digital level-testing system and the key technology of the large airplane[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.

[12] 李泷杲, 黄翔, 方伟, 等. 飞机装配中的数字化测量系统 [J]. 航空制造技术, 2010(23):46-48.

LI Longgao, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Digital measurement system for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23):46-48.

[13] 王莉, 方伟, 邢宏文. 大尺寸空间测量方法的实施及应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(B04):48-51.

WANG Li, FANG Wei, XING Hongwen. Implementation of measurement method for large scale roomage[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(B04):48-51.

[14] 王彦喜, 闵俊, 刘刚. 激光跟踪仪在飞机型架装配中的应用 [J]. 航空制造技术, 2010(19): 92-97.

WANG Yanxi, MIN Jun, LIU Gang. Application of laser tracker in assembly jig manufacturing for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(19): 92-97.

[15] 邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用 [J]. 航空制造技术, 2011(21): 72-75.

ZOU Aili, WANG Liang, LI Dongsheng, et al. Application of digital measuring system in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(21): 72-75.

[16] 吴晓峰, 赵祉江, 柳权. 大空间尺寸测量及大部件运输、跟踪、定位技术 [J]. 航空制造技术, 2009(24):38-41.

WU Xiaofeng, ZHAO Qijiang, LIU Quan. Measurement, transportation, tracing and positioning technology for huge-size part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24):38-41.

[17] 丁力平, 陈文亮, 卢鹤. 面向大型飞机装配的组合式大尺寸测量系统 [J]. 航空制造技术, 2013(13):76-80.

DING Liping, CHEN Wenliang, LU Gao. Combined large-scale measurement system for large aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13):76-80.

[18] 杨小丹, 李树军, 魏海涛, 等. 基于视觉检测的机器人自动制孔设备基准找正方法的研究 [J]. 机械制造, 2013, 51(11):57-59.

YANG Xiaodan, LI Shujun, WEI Haitao, et al. Research on the robot automatic hole boring machine based on visual inspection [J]. Machinery Manufacturing, 2013, 51(11):57-59.

[19] 秦现生, 汪文旦, 楼阿莉, 等. 大型壁板数控钻铆的三点快速调平算法 [J]. 航空学报, 2007, 28(6):1455-1460.

QIN Xiansheng, WANG Wendan, LOU Ali, et al. Three-point bracket regulation algorithm for drilling and riveting of aerofoil[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6):1455-1460.

[20] 王增翠, 秦现生, 白晶, 等. 飞机壁板自动制孔法向测量算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(6):160-163.

WANG Zengcui, QIN Xiansheng, BAI Jing, et al. Research on normal measurement algorithm in auto-drilling of aircraft panel[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(6):160-163.

[21] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法 [J]. 航空制造技术, 2011(22): 108-111.

DU Zhaocai. Measurement method for

evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22): 108-111.

[22] 王学影, 刘书桂, 王斌, 等. 关节臂式柔性三坐标测量系统的数学模型及误差分析 [J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(4):262-267.

WANG Xueying, LIU Shugui, WANG Bin, et al. Mathematical model and error analysis of the articulated arm flexible CMM[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(4):262-267.

[23] 郭辉. 关节臂式柔性三坐标测量系统关键技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.

GUO Hui. Study on the key technique of articulated arm flexible CMMs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[24] 雷宝, 贺韡, 王永红. 飞机部件外形三维数字摄影测量技术 [J]. 航空制造技术, 2013(7):42-45.

LEI Bao, HE Hua, WANG Yonghong. 3D digital photogrammetry for aircraft part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(7):42-45.

[25] 卢静怡. 三维激光成像系统中高精度测距技术的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

LU Jingyi. Precision ranging technology in three-dimensional laser imaging system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[26] 郭洪杰, 杜宝瑞, 赵建国, 等. 飞机智能化装配关键技术 [J]. 航空制造技术, 2014(21):44-46.

GUO Hongjie, DU Baorui, ZHAO Jianguo, et al. Key technology on intelligent aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(21):44-46.

Digital Measuring Technique in Aircraft Assembly

ZHANG Kaifu

(Ministry of Education Key Lab of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Since the 20th century, measuring technique in aircraft assembly procedure has been improved from qualitative and back test to quantitative and tracking measuring. Due to the development of intelligentization in aircraft assembly and consequently requirements in measuring, digital measuring technique becomes an essential factors in assembly procedure and are now stepping forward to intelligent measuring and feedback control. Four stages of measuring experienced in aircraft assembly are reviewed in this paper. Most of the measuring technique used in current aircraft assembly procedure are classified based on a proposed classification criterion, which includes point coordinates measuring, shape characteristics measuring and surface profile measuring.

Keywords: Digital measuring; Aircraft assembly; Intelligent assembly

(责编 玲犀)