

飞机装配质量数字化检测技术研究及应用*

赵建国, 郭洪杰

(中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 针对飞机装配过程质量评价对数字化测量技术的需求,开展了面向飞机装配的数字化测量特征设计、测量方案设计、多系统异构测量场构建、测量误差分析与修正等技术研究,并以表面类、内部结构特征、大部件对接和活动部件装配质量的控制为例,阐述了测量设备选型、整体测量场的构建方法及其应用效果。

关键词: 飞机装配; 数字化测量; 质量控制; 测量场

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.20.024



赵建国

沈阳飞机工业(集团)有限公司高级工程师,研究方向为数字化测量,飞机自动化柔性装配。发表学术论文 20 多篇(EI 检索 3 篇),申请国家发明专利 7 项,获得国防科技进步二等奖 1 项,中航工业集团科学进步一等奖 2 项。

现代飞机在性能、生产效率等方面要求全面提高,飞机生产模式向数字化协同制造模式演进,传统的飞机

* 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240423)。

测量技术已无法满足高精度、快速检测的需求,亟需发展三维数字化测量技术,为新机研制提供技术保障。

大型零部件加工的“一次正确性”、装配的“无缝连接性”是航空制造业最关心的问题,此类产品的加工和装配返工将大大增加制造成本、延长交付期。先进测量技术,特别是大尺寸测量技术应用于大型构件的加工和装配中,取得了较好效果,如 F-22 和 F-35 战机、ARIANE 运载火箭、Cupolas 国际空间站发射器以及波音 787、A380 等民用客机的装配中都广泛采用先进测量技术,显著提高装配自动化水平和效率,大大减少了装配返工和协调。国内数字化测量技术得到了长足发展,大量学者对关节式测量仪^[1]、激光跟踪仪^[2-3]等测量仪器的使用技术及误差分析,大尺度高精度坐标控制场的构建^[4-5],机器人定位误差评价^[6],飞机复杂装配配件的综合测量技术^[7]等开展了大量研究,为数字化测量技术在航空领域的应用奠定了基础。

针对新一代军机数字化设计、无

图制造的发展需求,以及复杂结构零部件检测困难现状,通过开展面向装配过程的产品质量检测手段及方法研究,建立适用于数字化制造模式的产品质量检测与信息管理体系,实现飞机检测手段从传统的手工检测向数字化检测模式的跨越,对增强新一代飞机快速研制能力,提高航空工业核心竞争力至关重要。

数字化测量技术

面向飞机装配的数字化测量技术是指在产品设计和工艺设计数字化基础上,围绕飞机装配工艺需求,研究与整个数字化装配生产线相匹配的测量方案及测量设备配置、测量工作模式以及数字化测量方法,搭建覆盖全局或局部的多系统异构集成应用平台,以此提高飞机装配质量和效率的一种综合测量技术。

1 测量关键特征

飞机数字化制造采用数字量进行协调,关键特征数据流贯穿飞机制造过程,关键特征的设计、提取、传递、转化、使用直接影响飞机数字化

制造的质量和效率。在CAD系统中,特征被认为是某种具有形状和功能属性的信息集合,是产品制造质量关键控制要素,依据飞机典型结构件的几何及检测特点,将面向飞机结构件的检测特征进行归纳,如图1所示。

以装配单元为数据集,面向飞机装配的测量关键特征包括:定位协调基准、测量点集、特征识别物等。关键特征的设计应遵循以下原则:(1)测量点应在具有高强度、刚性好、变形较小的结构件上选取,如加强框、梁等;(2)测量点尽量在设计分离面、工艺分离面和对接面上;(3)测量点的分布合理,具有代表性;(4)测量点具有较高的位置和几何精度,尽量与K孔、定位孔和工艺孔一致;(5)测量点位置应保证测量的可达性。

按上述规则选取关键特征点后,按测量点位、零部件成型工艺、测量误差项、刚性以及对飞机装配精度的影响等信息对关键特征点进行综合评价,并分配相应的权重系数。特征点的详细信息可结合数模进行提取。

2 测量方案设计

正所谓“尺有所短,寸有所长”,每种测量手段都有其适用条件,单一测量设备不可能覆盖飞机制造的全流程,测量方案设计应综合考虑测量需求、测量经济性和应用环境,具体如下:(1)制定面向飞机装配质量过程控制的测量工艺规范,搭建多系统异构集成测量规划管理平台,建立数字化测量技术应用体系。(2)统筹规划和分析整个数字化装配流程的测量技术方案及其实施策略。深入分析装配数据传递方式、误差来源,并结合特征点的采集方式,开展相应测量规划仿真,优化测量方案。(3)整合面向装配质量过程控制的多种数字化测量技术,如激光三维扫描法、双目视觉测量方法、激光干涉测量方法等,重点分析各自特点和适应性,发挥各种测量手段的优势,以及

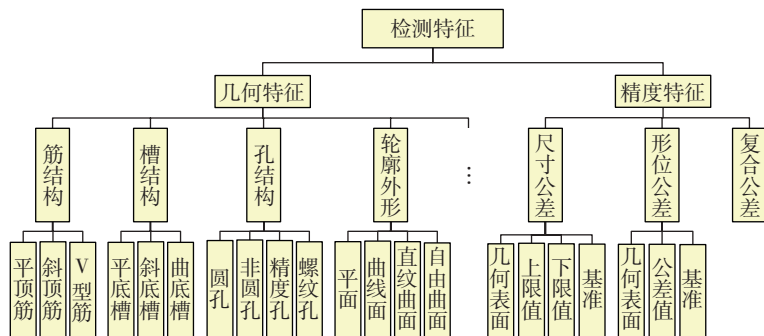


图1 飞机结构件的检测特征

Fig.1 Detection feature of aircraft components

上述方法的组合集成测量方法。(4)测量数据分析与处理。在同一坐标控制场的支撑下,通过测量软件的二次开发,协同工作,对测量特征信息进行筛选分类,统一数据标准格式,便于数据流在不同工序间的高效传递。(5)测量设备与工艺装备的集成。搭建信息协同交换平台,统一测量设备和工艺装备的信息交互接口,实现测量设备和工艺装备的高效集成。

3 测量误差与修正

三维坐标测量设备采集待测工件的几何特征信息,通过软件特定算法获取待测几何特征参数值,因此测量精度主要与下列因素有关(图2)。

测量设备系统误差包括仪器信息采集误差、坐标变换误差、数据格式转换误差,控制方法如下:(1)选择合理的测量设备,通常为了提高测量设备精度,生产商都提供相应的误差补偿软件。(2)合理布置测量设备,减少转站次数并设置合理的转站点。如激光跟踪仪的主要误差是由角度编码器误差产生的,布置设备时应尽量减少测量头的摆角;iGPS是采用三角原理定位的,也应合理布置基站,控制交汇角,以提高精度。测量设备的转站不可避免带来误差,应合理布置,尽量减少转站次数。转站时,转站点对转站后坐标系的拟合精度影响较大,应科学地设计转站点。(3)统一数据信息交换接口,减少数据格式转换次数,将信息损失降到最低。各设备间的数据格式不同,精度

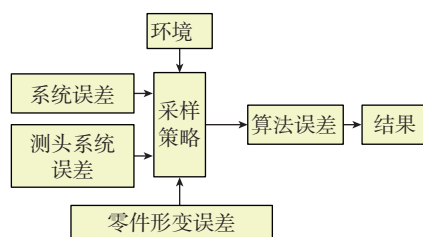


图2 影响被测参数测量精度的因素

Fig.2 Effect of measure factors to error

也不同,应通过改善转换接口、提高算法精度,避免信息丢失。

测头系统误差可按测量设备要求使用测头来降低。此外,测量目标安装和定位误差也使测量精度降低,故应准确安装定位测量目标。

信息采样及零件形变误差:测量特征信息采样对测量精度影响较大。通常情况下,对待测特征进行全息采集是不现实的,采样方案不同,测量结果差异较大,如避免采用小圆弧测量大直径。对于体积和重量较大的被测物体,夹持方式不同,受重力影响其形变规律差异较大,给关键测量特征评价带来较大的不确定度。为保证产品装配质量,必须对检测特征量进行补偿,主要的方法有经验法、理论法和数值法,经验法计算效率高但精度低,理论法难于建立数学模型、应用受限,数值法易于实现、精度高、适用范围广。数值法主要利用有限元、有限差分法等,建立数学模型,借助试验修正边界条件,提高模型的准确性,通过数值迭代计算,确定检测特征量在不同状态下的弹性形变量,并与测量值进行矢量叠加,

提高飞机装配过程中质量评价精度。

算法计算误差:待测量特征与理论状态有一定差别,在数据处理中需假设一理想元素,通过拟合确定待测量特征值。常用的拟合算法有:最小二乘法和寻优算法,每种算法都有其相应的适用条件,应综合考虑特征量的误差来源、误差性质和误差权重等的影响,选取合理的算法,有效降低算法误差的影响。

环境因素:测量现场环境复杂,不同材料热敏感系数差别较大,所以温度变化对测量精度影响很大。为避免温度变化对测量性能的影响,测量设备采用温度补偿技术,提高测量设备适应环境的能力,修正因温度变化引起变形而产生的误差。

结果与讨论

随着数字化技术的应用和测量技术的发展,现代飞机装配现场采用数字量进行协调,简化了工装安装和校验的过程,取消了标准样件,大幅度缩短了生产准备周期,提高飞机装配过程检测精度和效率,实现了新型飞机的快速研制和生产。

1 表面类特征检测

飞机装配过程中,主要的表面类特征包括间隙、阶差、波纹度和气动外形,直接影响飞机的隐身性和气动特性,传统检测方法存在以下问题:

(1)间隙和阶差检测。间隙和阶差依靠塞尺测量,表面沉头孔(包括铆钉孔和螺栓孔)采用窝量规等模拟量检测,依靠工人肉眼判断,检测精度与工人经验有关,测量准确度低。

(2)波纹度和气动外形检测。采用卡板检测精度低,不能定量分析气动外形误差大小,而且卡板制造周期长,费用高,安装劳动强度大,很难实现飞机部件全部外形的测量,影响飞机制造精度。

国际上先进的表面类特征的检测技术采用光学非接触式测量,如图3所示,主要包括:



(a) 摄影测量



(b) 白光测量

图3 摄影测量与白光测量

Fig.3 Measurement of photo and white light

(1)摄影测量。采用特定的工业相机,在不同的位置对待测物体进行拍照,再将数据传给后台计算机,通过软件对采集图像进行处理,最终得到被测物体的表面点云图,并与理论数模进行对比,实现了物体的表面尺寸检测。适用于大型部件及整机的测量,效率较高,精度在亚毫米级。

(2)白光测量。仿照人眼视觉原理,通过多个特定布置相机,利用二维光学成像重建工件的三维数学模型。适用于飞机零部件的测量,测量误差低于0.1mm。

此外,现代飞机制造向着异地协同模式发展,一些重要零件,特别是大型零部件,协调关系复杂,如大型的舱门、口盖类、翼面类零件,配合面形状复杂,通过对配合面的三维形貌扫描,预判零部件匹配程度,降低返厂返修率,保证飞机研制进度。

2 内部结构特征检测

内部结构特征包括框位、交点孔、K孔、工艺孔、关键飞行传感器支架等。由于上述特征位于机体内部,通视性较差,常规光学测量仪器很难发挥作用,可采用关节臂测量(图4)。它是一种耦合转动关节和定长



图4 关节臂测量

Fig.4 Arm CMMs

臂的坐标测量系统,转动关节处设有角度编码器,用于测量转角信息,定长臂精确标定,经过系列坐标变换得到待测特征坐标向量值。

受臂长限制,关节臂通常只能完成局部零部件的检测,而飞机尺寸长达几十米,如通过关节臂自身蛙跳实现转站,误差积累相当大,影响测量精度。实际测量时,可采用激光跟踪仪或激光雷达等大范围测量工具,通过相匹配的接口(如球心),为关节臂提供全局基准,以此实现大尺度内部结构特征的检测。

3 大部件装配质量检测

飞机大部件对接采用组合测量方式,解决大尺寸空间测量精度和测量范围相互矛盾,充分发挥不同测量设备的优势。克服仅凭单一测量设备达到大范围高精度测量技术难度大、成本高的瓶颈问题,其中主流的组合方案包括室内GPS结合激光跟踪仪、室内GPS和激光雷达,优化室内GPS测量站位,测量接收器预置在关键测量特征处,实时反馈测量值,进而监控飞机大部件的位置和空间姿态。同时,结合大部件对接柔性工装控制系统,自动完成飞机部件的定位、移动、调整、对接等,实现大部件对接闭环动态引导(图5)。基于室内GPS的多任务数字量协调精度控制技术在波音787总装过程中实现了大部件自动对接应用,装配时间从几天缩短至几小时。国内采用该方法缩短了飞机大部件自动对接装配周期50%以上,自动对接误差仅为传统工艺的20%。

4 活动部件检测

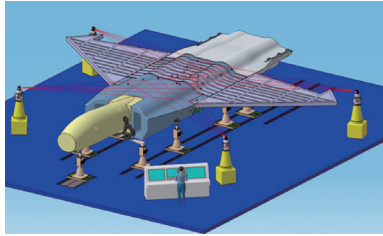


图5 飞机大部件数字化测量场
Fig.5 Digital measurement system for huge fuselage

活动部件包括舵面、活动舱门、起落架等,由于缺乏对待测件运动路径的有效描述,传统制造采用经验法和试配法,导致工作强度大、装配周期长,特别是传动环节多的系统,严重制约着飞机的研制进度。

动态监测技术,采用多个摄像机的摄影测量系统,测量过程中,摄像机固定于工作站位,各摄像机经精确标定,组成多目摄影测量系统。飞机活动部件上设置靶标点,靶标点与活动部件同步运动,摄像机通过跟踪靶标点进而推算活动部件的运动轨迹,利于快速排查问题,提高装配效率和精度。多目摄影系统的另一个重要作用是自动加工设备的导航,通过在末端执行器上设置3个以上靶标点,可实时检测末端执行器的空间位姿,提高自动加工设备精度(图6)。

结论

(1)开展了面向飞机装配质量检测的数字化测量特征设计、测量方

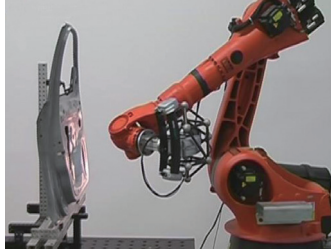


图6 机器人加工误差补偿
Fig.6 Error compensation for robot drill

案设计、多系统异构测量场构建技术研究,搭建了覆盖全局(大尺度空间范围内)和局部的多系统异构数字化测量平台,促进了飞机装配质量和效率的提升。

(2)对影响测量精度的因素进行了深入研究,并结合装配测量工艺需求和测量设备特点,提出了误差项的分析与优化控制方法。

(3)以表面类、内部结构特征、大部件对接和活动部件的装配过程质量控制为对象,阐述测量设备选型、整体测量场的构建及其应用效果,为数字化测量技术在飞机装配领域的应用提供借鉴。

参考文献

- [1] 胡毅, 费业泰, 程文涛. 关节式坐标测量机热变形误差及修正[J]. 机械工程学报, 2011,47(24):15-19.
- [2] 刘欣丽, 张国雄, 李杏华. 激光跟

踪测量系统中的光学误差分析[J]. 光学技术, 2004,30(2):245-247.

LIU Xinli, ZHANG Guoxiong, LI Xinghua. Optical error analysis in the laser tracking measure system[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 245-247.

[3] 马骊群, 王继虎, 曹铁泽, 等. 激光跟踪仪测角误差的位移标定法[J]. 计量学报, 2009,30(S1):76-78.

MA Liqun, WANG Jihu, CAO Tietze, et al. Calibration for angular error of laser tracker by small displacement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2009,30(S1):76-78.

[4] PREDMORE C R. Bundle adjustment of multiposition measurements using the mahalanobis distance[J]. Precision Engineering, 2010,34(1):113-123.

[5] 林嘉睿, 郑继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. 仪器仪表学报, 2012,33(2):463-468.

LIN Jiarui, ZHU Higu, ZHANG Haolin, et al. Field evaluation of laser tracker angle measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(2):463-468.

[6] 齐立哲, 陈磊, 王伟, 等. 基于激光跟踪仪的机器人误差测量系统标定[J]. 工艺与检测, 2012(10):90-94.

QI Lizhe, CHEN Lei, WANG Wei, et al. The calibration for industrial robot's position error measuring system based on the laser tracker[J]. Technology and Test, 2012(10):90-94.

[7] 刘胜兰, 罗志光, 谭高山, 等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2):409-418.

LIU Shenglan, LUO Zhiguang, TAN Gaoshan, et al. 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assemblies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(2):409-418.

Study and Application of Digital Measurement Technology for Aircraft Assembly Precision

ZHAO Jianguo, GUO Hongjie

(AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] To improve digital measurement technology for aircraft assembly, key digital measure factor design, measure plan design, building measure system with multiform devices, measurement error analysis and compensation are studied. Then measurement devices and system building are illustrated, assembly precision inspection used for surface and inside framework factor, huge and kinetic components measuring are proved.

Keywords: Aircraft assembly; Digital measure; Assembly precision control; Measurement system

(责编 李丹)