

飞机装配协同测量技术应用*

赵建国, 邓春利, 郭洪杰, 于思阳

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 针对飞机装配对大尺度、高精度、多任务和快速测量的需求,介绍了面向飞机数字化装配的测量基准标定、测量设备协同工作模式等方法,阐述了多系统协同测量的技术方案,基于 USMN (Unified Spatial Metrology Network) 构建包络飞机全尺寸的测量基准网,形成适应飞机装配的多系统协同测量模式,可实现内部隐藏特征、孔位信息、轴线、配合型面、气动外形和间隙阶差的测量,满足了飞机装配的三维数字化测量需求。最后以全机对合测量与大型零部件表面测量为例,验证协同测量的有效性。

关键词: 飞机装配; 协同测量; 测量网标定; USMN; 三维数字化测量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.059



赵建国

博士、高级工程师,研究方向为数字化测量与柔性装配。

数字化测量已融入飞机装配的各个环节,应用模式由质量检测向工艺过程控制转变。数字化测量手段种类繁多,其适用范围和性能指标差异较大,很多场合单一设备无法实现测量需求全覆盖,亟需发展多设备协同测量技术,为飞机装配奠定技术基础。

* 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240423)。

飞机数字化装配生产线采用数字量协调,无论是工装制造还是飞机零部件安装定位,均离不开数字化测量技术的支持。国外,数字化光学测量技术成功应用于飞机大型部件装配中,军机如 F-22 和 F-35 战机,民用飞机如波音 787、A380 等,显著提高了装配精度和自动化水平,大大缩短了飞机装配周期。国内各主机厂引进大量先进设备,数字化测量技术得到了长足发展,大量学者开展了数字化测量技术研究及应用,如面向飞机复杂装配件的协同测量技术^[1]、大尺度高精度坐标控制场的构建与误差评定^[2-4]、统一坐标测量网 USMN (Unified Spatial Metrology Network) 技术^[5-7]、基于激光跟踪仪 EMSCON 的二次开发^[8]等,为数字化测量技术在航空领域的应用奠定了基础。

因此,针对飞机装配的测量工艺需求,梳理各测量设备的适用范围和性能指标,开展面向飞机装配的协同测量应用技术研究,对促进飞机装配工艺持续改进、保证飞机装配质量、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。

协同测量技术

为满足飞机装配对大尺度、高精度、多任务和快速测量的需求,研究与飞机数字化装配相匹配的测量基准标定、测量设备配置、测量工艺和测量协同工作模式,构建包络飞机全尺寸的测量基准网,制定适应飞机装配的多系统协同测量方法,优化测量技术方案,可缓解测量精度、测量效率和测量成本之间的矛盾,为保证飞机装配质量和效率奠定基础。

1 测量基准高精度标定

飞机尺寸较大,测量特征包括点、线、面,测量精度要求高,而且受测量距离、光路遮挡和操作空间影响,单一测量设备或单一测量站位无法实现测量需求全覆盖。目前主流解决方式是建立统一的高精度测量基准网,采用多种设备协同测量,满足不同装配环节测量精度要求,具有测量扩展性好、坐标参考一致、测量经济等优点。

测量基准网要求精度高,空间大(可包络飞机总体尺寸),测量基准点稳定,抗震和通视性好,测量基

准易被测量仪器识别,识别特征唯一。装配现场大尺度高精度测量,通常采用激光跟踪仪,但激光跟踪仪20m 距离测量不确定度达到0.2mm (现场测试指标),无法直接进行测量基准网的高精度标定。由于激光跟踪仪长度采用激光干涉仪测量,精度较高,两个角度编码器测量水平角和俯仰角,是误差的主要来源,对测量不确定度影响最大。通过统一坐标测量网 USMN 技术,采用多站位首尾闭环测量,依不确定度为每个拟合元素分配权重,经加权平差优化处理,可有效提高测量基准网标定精度。USMN 已经工程实践验证^[5-7],并集成在大型测量软件中(如 Spatial Analyzer, SA),便于工程化应用。由 USMN 所构建的测量网的测量不确定度既具有测量设备本身的特征,又体现出各测量设备测量不确定度分量的优势,使测量基准的不确定度得到改善,如图1所示。

2 多系统协同模式

装配现场测量检测手段繁多,每

种测量手段都有其独特的原理、适用范围和操作软件,针对复杂的装配测量任务需求,需要搭建多系统协同工作平台,才能实现测量坐标系的统一,保证各系统测量数据高效传递和相互识别,具体协同方法如下:

(1) 公用软件。每种测量设备都有各自专用的软件,有的设备分为底层操作和数据处理软件,如激光雷达、Romer 关节臂测量机和 Metronor 光笔测量系统等,众多软件的操作流程、数据组织形式和后处理差异较大,而且软件间数据传递困难,难于实现系统协同工作。所以,选用软件时,应选用兼容多种测量设备的数据采集和分析软件,如 SA 和 POLYWORKS 等,实现多系统的协同工作,不但测量设备管理方便,而且测量结果分析和检测报告形式一致,易于理解。图2所示为基于 SA 的多系统协同测量方案。

(2) 基于 SDK 的二次开发。主流测量软件均设有软件开发工具包 SDK (Software Development Kit),

利用 Visual Studio 开发平台,通过 TCP/IP 协议建立测量软件之间、测量软件与协同控制系统之间的通讯连接,实现多测量系统的协同工作,数据采集、分析、处理更加方便,数据格式转换自如,测量界面可定制,满足测量工艺的个性化需求,并节省大量人机交互操作,大大提高测量工作的自动化水平。通过基于 SDK 的二次开发,实现测量设备与车间生产管理系统集成,方便装配工艺过程的质量数据管理与追溯,促进工艺改进,提高飞机装配质量。

(3) 专用接口。有些测量设备工作时需其他设备的辅助,如 Aicon 扫描仪,在进行大尺寸零件扫描时,需扫描多次,然后拼合成整体。拼图方式主要有3种,包括粘贴标识点、光学定位扫描和机器人定位扫描,其中后两种需与其他仪器和设备协同工作。如 Aicon 扫描仪操作软件 OPTOCAT 中,提供了与跟踪测量系统和机器人的专用接口模块(见图3),实现了多系统协同工作,减少了在待测零件上粘贴/去除标识点的工作,测量更加方便快捷。

3 多系统协同测量方案

多系统协同测量通过整合数字化装配应用的数字化测量方法,如室内 GPS、激光跟踪、三维扫描和关节臂测量方法等,系统分析设备特点和适应性,充分发挥各种测量手段的优

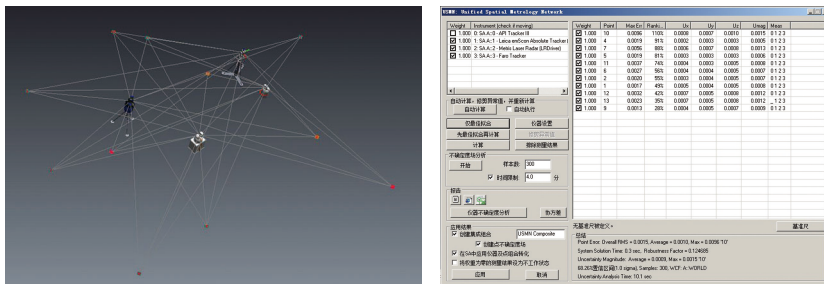


图1 基于USMN的测量基准网标定

Fig.1 Precision calibration of measure net based on USMN

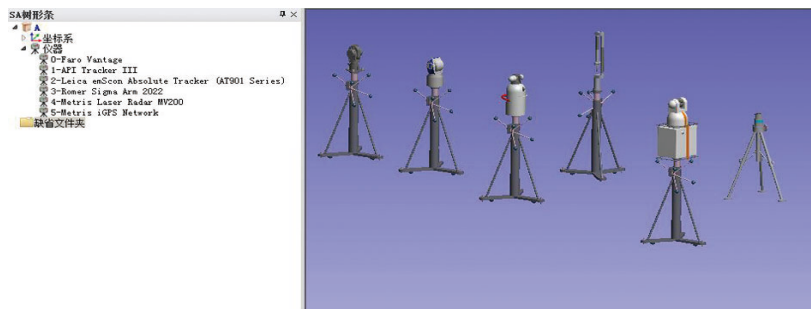


图2 基于SA的多系统协同测量

Fig.2 Multi-system cooperative measure based on SA

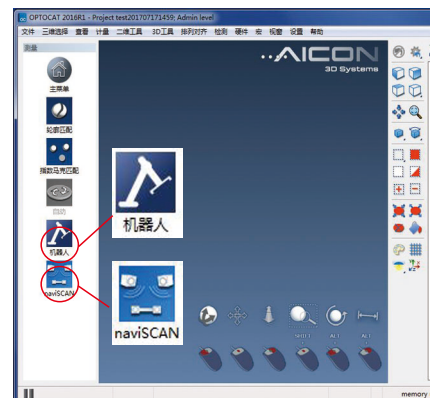


图3 OPTOCAT的专用接口模块

Fig.3 Special interface module for OPTOCAT

势,优化集成测量方案,达到测量精度、效率和成本的统一。多系统协同测量方案主要包括以下4个方面:

(1) 动、静协同测量。飞机装配过程中,采用数字化自动装备完成零/部件的自动姿态调整 and 对接,整个工艺流程要求零/部件按预定轨迹运动,运动完成后进行精确定位,需要采用动态监控系统跟踪运动轨迹,采用高精度的静态测量设备完成精确定位。活动部件检测,如舵面、活动舱门和起落架等,可采用动态监控技术实时测量其空间位置和角度,为现场装配提供数据支持,提高装配精度和效率,装配完成后采用静态测量设备完成活动部件间、活动部件与机体间的相对位置关系检测,评价装配质量。通过在末端执行器上设置多个标识点,动、静协同测量还可以为自动加工设备提供外闭环反馈,可实时检测末端执行器的空间位姿,提高自动加工设备的精度。

动态监测技术一般采用多个摄像机组成测量系统,或采用室内GPS,通过监控预置在待测零/部件上的标识点或接收器,快速解算运动零/部件的运动轨迹。静态监控技术多采用激光跟踪仪或激光雷达,二者是目前装配现场精度较高的技术手段,可实现零/部件的高精度测量。

(2) 内、外协同测量。飞机结构特征,包括框位、交点孔、K孔、工艺孔、关键飞行传感器支架等,对飞机机体结构、飞行控制影响较大。上述特征位于机体内部,由于通视性较差,常规光学测量仪器很难发挥作用,一般可采用光笔测量,通过选用不同规格的加长杆,经过精确标定,可以间接测量内部特征,扩大仪器的测量范围。位于机体外部的特征,可采用激光跟踪仪或激光雷达等测量。

(3) 长、短协同测量。关节臂测量机灵活性强,不受光学遮挡影响,

而且可以测量隐藏结构,但受臂长限制,通常只能完成局部零/部件的检测,而飞机尺寸长达几十米,如通过蛙跳转站测量,累积误差大,测量精度和效率低。装配现场可采用激光跟踪仪或激光雷达等长距测量工具,为关节臂提供转站的基准,统一各站位坐标系,发挥长、短协同测量优势,满足装配测量工艺要求。

(4) 粗、细协同测量。零件局部细节一般采用三维扫描仪测量,大尺寸零件测量需要多次扫描,以标识点为基准拼合扫描数据,但标识点需要手工粘贴和清除,工作量大,而且对有特殊材料涂层的零件会造成污染。光学定位扫描近些年得到了大量应用,将标识点与扫描仪固连,采用摄像监控系统实时采集标识点空间坐标,进而实现对扫描仪的空间定位,以此完成多幅扫描数据的拼合,测量效率高、适用性广。摄影测量在不同位置和角度对被测物体拍摄多幅照片,利用计算机图像匹配技术,可以得到被测物体上标识点的三维空间坐标,但该方法进行大尺寸全机外形测量时误差较大。通过其他仪器引入长度约束,可以提高整体测量精度。典型应用案例如Aicon扫描仪+Move Inspect动态检测系统或Metronor跟踪系统、Creaform扫描仪+双摄像头跟踪器、V-STAR摄像机+LEICA激光跟踪仪等。

协同测量技术应用案例

随着数字化测量技术的发展,飞机装配协调方式由模拟量向数字量演变,国内各大主机厂在引进先进数字化测量技术的同时,还针对复杂的工艺需求制定了协同测量技术方案,促进了装配工艺水平的整体提升,提高产品质量和生产效率,实现了新型飞机的快速研制和生产。下面以全机对合和大型零部件测量为应用对象,验证协同测量技术的有效性。

1 全机对合动态监控与精确调整

飞机大部件对合工艺要求各部件按预定路径运动,到达预定位置后对部件位姿进行精确定位,需采用动、静协同测量方式,满足动态监控和精确定位的要求。装配现场采用室内GPS结合激光跟踪仪的测量方式,组成协同测量网,如图4所示。动态监控精度验证,将飞机部件放置在运动精度0.05mm数控系统上,测试距离5m,通过动态同步对比,室内GPS动态监控精度可达0.5mm。精确调整精度验证,采用定长标准尺,尺长为 (762.036 ± 0.005) mm,靶球为1.5英寸(1英寸=2.54cm),在飞机装配测量场内(10m×10m×5m),每间隔1m,按水平和竖直两种姿态,测量标准尺,激光跟踪仪测量偏差不超过0.1mm。

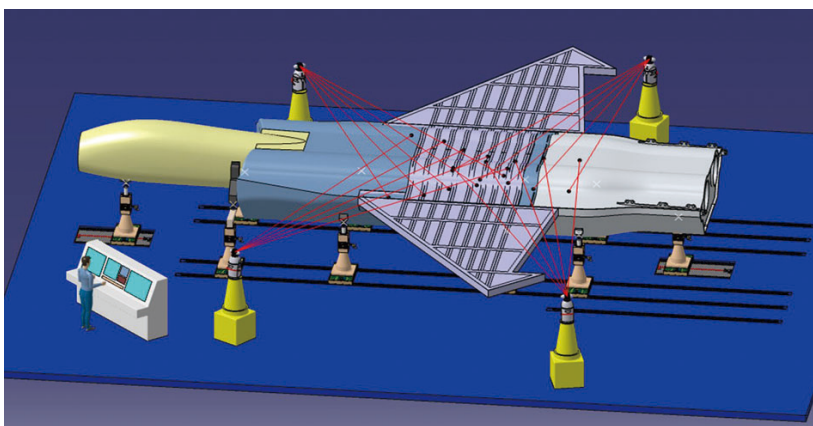


图4 全机对合测量工艺试验

Fig.4 Measure process experiment of huge components assembly

实际现场全机对合,通过测量预置在飞机部件上的接收器或靶球,室内GPS实时监控飞机部件位置和空间姿态,并辅助大部件对接柔性工装系统,完成飞机部件的移动。然后,在激光跟踪仪的引导下完成飞机部件姿态精确调整和全机对合。整个对合过程中,测量设备为运动执行系统提供闭环反馈,保证了飞机的对合精度,避免了飞机部件偏离路径造成碰撞的风险。该技术已成功用于多个机型多架次飞机的对合工作,显著提高了飞机装配精度和效率。

2 大型零部件表面测量

飞机大型零部件表面测量包括气动外形、波纹度、间隙和阶差测量,测量现场一般使用三维扫描测量采集点云数据,然后进行数据分析,提取相关质量数据。点云采集使用Aicon扫描仪,监控扫描仪空间姿态,提供图像拼合依据使用Metronor跟踪系统,如图5所示。测量前首先标定跟踪定位笼形架与扫描仪位置关系,测量时Metronor跟踪系统实时采集定位笼形架,进行扫描仪的定位,实现多幅图像的拼接。



图5 Aicon扫描仪与Metronor跟踪系统协同测量

Fig.5 Cooperative measure of Aicon and Metronor

精度验证采用定长标准尺,标准尺两端放置直径1.5英寸(1英寸=2.54cm)亚光球,尺长为 (762.036 ± 0.005) mm,球径 (38.1 ± 0.003) mm。测量范围 $5m \times 5m \times 2m$,每间隔1m,按水平和竖直两种姿态测量标准尺长度和球径,长度误差不超过0.1mm,球径误差不超过0.05mm。

采用Aicon扫描仪与Metronor跟踪系统协同测量方法,满足了飞机气动外形、波纹度、间隙和阶差测量的需求,避免了标识点的粘贴和去除工作,显著提高了测量效率。

结论

(1) 开展面向飞机数字化装配的测量基准标定技术研究,采用USMN统一测量网技术,通过激光跟踪仪对飞机装配现场测量网进行标定,测量不确定度可控制在0.05mm以内。

(2) 通过采用公用软件、基于SDK的二次开发和软件专用接口,实现多系统协同工作,形成适应飞机装配的多系统协同测量机制,并提出4种典型搭配形式。

(3) 以全机对合动态监控与精确调整、大型零部件表面测量为例,验证协同测量的有效性,促进了面向飞机装配测量工艺技术提升,提高了飞机装配质量和生产效率。

参考文献

[1] 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.

[2] 林嘉睿, 郝继贵, 郭寅, 等. 现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 6-11.

LIN Jiarui, ZHU Jigui, GUO Yin, et al. Establishment of precise three dimensional coordinate control network in field large-space measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 6-11.

[3] PREDMORE C R. Bundle adjustment of multi-position measurements using the Mahalanabis distane[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 113-123.

[4] 林嘉睿, 郝继贵, 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 Jigui, ZHANG Haolin, et al. Field evaluation of laser tracker angle measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 463-468.

[5] 马骊群, 曹铁泽, 王继虎, 等. 大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题[J]. 计测技术, 2013(2): 7-11.

MA Liqun, CAO Tieve, WANG Jihu, et al. Discussion on inspecting the assembling components by using large volume metrology instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013(2): 7-11.

[6] ASME International. ASME B89.4.19-2006. Performance evaluation of laser-based spherical coordinate measurement systems[S]. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, 2006.

[7] 周闻青, 冷建兴, 叶欣, 等. 基于USMN的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究[J]. 计测技术, 2016, 36(3): 10-13.

ZHOU Wenqing, LENG Jianxing, YE Xin, et al. A measurement method of maneuvering tank rotary bridge based on USMN[J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(3): 10-13.

[8] 胡宝海. 基于EMSCON的多激光跟踪仪协同测量关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

HU Baohai. EMSCON-based collaborative measurement technologies of multi-laser tracker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

通讯作者: 赵建国, E-mail: zjg_5352@163.com.

(下转第73页)

动化装配关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

JIANG Liping. Research on key technologies for automatic assembly of midship fuselage based on model definition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[9] 常俊超, 姜楠. 基于 3D 打印技术在航空领域的应用分析 [J]. 科技资讯, 2015(14):13.

CHANG Junchao, JIANG Nan. Application analysis based on 3D printing technology

in aviation field [J]. Science & Technology Information, 2015(14): 13.

[10] 王飞, 杨湘龙, 冯允成. 虚拟现实仿真技术及在飞机装配中的应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 213-216.

WANG Fei, YANG Xianglong, FENG Yuncheng. Virtual reality simulation and its application on aircraft assembling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2): 213-216.

[11] 李晓红, 高彬彬. 先进制造技术创

新促进空客“未来工厂”建设 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 28-31.

LI Xiaohong, GAO Binbin. Advanced manufacturing technology innovation promoting the construction of “Future Factory” of airbus group[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 28-31.

通讯作者: 李西宁, 博士、副教授, 研究方向为装配与连接技术、板料成形技术, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn.

Research on Modular Assembly Technology of Aircraft Wing

WANG Shouchuan¹, HAO Ju¹, LI Xining², GUO Feng¹, WANG Yonghong¹, WANG Zhanfeng¹

(1. Tooling Design Institute, AVIC Xi'an Aircraft Industrial (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] In view of the engineering realization of the modular assembly of a large aircraft wing, the technical background and the modular features of the aircraft components module are analyzed, and the module assembly process and the influencing factors are combed. The engineering design of wing assembly process, wing integration / flexible assembly and active airfoil unit is carried out. The integrated flexible working platform and rail mounting vehicle are designed. The design and analysis of control logic structure, test method and test equipment planning for aircraft active airfoil are finished. Finally, the application of wing module assembly and its effect are introduced.

Keywords: Modular assembly; Assembly platform; Rail mounting; Active airfoil; Actuation control; Deflection detection; Sensor detection

(责编 铃兰)

(上接第 62 页)

Application on Cooperative Measure Technology for Aircraft Assembly

ZHAO Jianguo, DENG Chunli, GUO Hongjie, YU Siyang

(AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] To meet requirements of measure during aircraft assembly process, such as big dimension, high accuracy, multitask and quick measure, the methods are developed including precision calibration of measure basis network facing on aircraft digital assembly, multi-systems cooperative measure, and technology solutions are described. Then measuring basis network covering total aircraft based on USMN is built to improve accuracy measuring reference. Work pattern of cooperative measure including multi-system is established to extend measuring scope and accuracy. The method was developed in this paper can realize the measurement of internal hidden features, hole position information, axis, mating surface, aerodynamic profile, flush and gap on the aircraft skins, meets the requirements of three-dimensional digital measurement for aircraft assembly. At last, the methods of cooperative measure are validated by measure process experiment of huge components assembly and huge parts surface feature including aerodynamic profile, flush and gap on the aircraft skins.

Keywords: Aircraft assembly; Cooperative measure; Precision calibration of measure net; USMN (Unified Spatial Metrology Network); 3D digital measuring

(责编 铃兰)