

基于测量组网的大尺寸高精度测量场研究

陈杰¹, 杨亚鹏¹, 杜坤鹏¹, 陈少帅¹, 王光周²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089;

2. 空军装备部驻西安地区第一军事代表室, 陕西 西安 710089)

摘要:针对大飞机制造过程中精度要求越来越高, 现有测量手段无法满足大范围高精度测量的问题, 用4台激光跟踪干涉仪搭建测量场, 对测量场与测量场、测量场与激光雷达、测量场与激光干涉仪等数字化测量设备搭建测量组网的方法进行研究。基于该设备组网建立大范围高精度测量场, 20 m 测量范围内测量精度能够达到 0.02 mm, 应用该测量场既能直接测量飞机大部件位置, 也能够对激光雷达、激光间隙枪或激光跟踪干涉仪等其他测量设备进行高精度定位测量。

关键词:测量场; 测量组网; 激光跟踪干涉仪; 大尺寸; 高精度

中图分类号: TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)05-0070-04

Research on Large-scale and High-precision Measurement Field Based on Measurement Network

CHEN Jie¹, YANG Yapeng¹, DU Kunpeng¹, CHEN Shaoshuai¹, WANG Guangzhou²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. The First Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Xi'an, Xi'an 710089, China)

Abstract: In view of the increasing high accuracy requirements in the manufacturing process of large aircraft and deficiency in large-scale high-precision measurement by existing measuring methods, this paper studies the method of building a measurement network of a measuring field, measuring field and measuring field, measuring field and lidar, measuring field and laser interferometer and other digital measurement equipment by four laser tracking interferometers. Based on the network, a large-range high-precision measurement field is established, whose measurement is as accurate as 0.02 mm within 20 meters, and whose application can not only directly measure the position of large parts of the aircraft, but also can carry out high-precision positioning measurement of other measurement equipment such as lidar, laser gap gun or laser tracking interferometer.

Keywords: measuring field; measurement network; laser tracking interferometer; large size; high precision

0 引言

随着飞机制造技术的不断发展, 复合材料、钛合金材料等难加工材料的大量使用, 对缝间隙、阶差等装配特征精度提升数倍, 在机体尺寸增加的前提下仍需满足高精度装配要求, 对测量技术的要求也越来越高。数字化装配系统、模块化装配系统、柔性装配系统等装配系统在一定程度上可提高产品装配质量, 但传统的 iGPS 和激光跟踪仪等测量方法无法达到测量精度要求。针对新一代飞机装配对高精度测量系统的迫切需求, 本文将研究大尺寸空间高精度测量场测量技术, 实现飞机大型零部件几何尺寸、形位误差、外形特性和空间位置的高精度测量, 并与多种测量系统相互结合使用, 满足复杂装配现场的多任务测量需求。

1 国内外研究现状

基于单一产品数据源的数字量协调体系是数字化装配技术的基本特点, 数字测量技术为实现数字化精确装配

提供了基础保障^[1]。传统的飞机部件装配主要依靠工装和工艺补偿来保证零部件之间的协调, 依靠模线模板、光学仪器等装备检测装配质量^[2]。这些方法精度差、效率低, 已不能适应现代飞机发展的需求。国外先进飞机制造公司已经开始大规模将数字化测量系统引入飞机装配中, 利用数字化测量系统高精度的测量、控制和分析系统, 提升飞机装配精度^[3-7]。为了保证装配质量和装配效率, 必须构建统一的大尺寸测量场, 将多个坐标系统一到全局理论坐标系中。通过布设基准点 (TB 点、ERS 点), 为众多的坐标系提供坐标转换的媒介, 以便为工装安装、飞机部件对接调姿、飞机蒙皮外形检测提供测量基准^[8]。于成浩等^[9-11]针对激光跟踪仪的测量特性, 对三维测量控制网进行了构建流程介绍和精度分析, 针对激光跟踪仪测距精度高而测角精度低的特点, 提出了通过改变仪器位置使得仪器到被测点距离不变, 尽量减小测量角度来减小测量误差的观点。林嘉睿等^[12]提出通过多站位测量公共基准点来构建精密测量场, 针对激光跟踪仪距离测量值精度高的特点, 以距离测量值为约束优化测量结果, 减小测角误差。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB17075001)

第一作者简介: 陈杰 (1997—), 男, 陕西商洛人, 工程师, 本科, 研究方向为大型复合材料结构飞机数字化制造技术, 625099258@qq.com。

朱永国等^[13]基于基准点的布设误差大于测量误差的特点,建立了飞机装配测量控制网的误差模型,对数学模型求解得到7个误差参数的协方差矩阵,在此基础上建立公共基准点位置和数量与测量场精度的关系,得到了在没有粗差存在的前提下公共基准点数量越多测量场精度越高的结论,最后通过蒙特卡洛仿真分析和实验,在兼顾成本与精度的原则下给出使用7个公共基准点的建议。基于测量的数字化装配已经成为飞机制造发展的必然趋势,而现有的装配手段已无法满足,主要体现在以下几个方面:

- 1) 测量设备精度较差,无法实现大尺寸空间的高精度测量;
- 2) 产品测量特征复杂多变,测量设备选型多样,测量数据坐标系高度不统一,数据处理难度大;
- 3) 装配过程中零部件、装配工装会存在互相遮挡的限制,存在测量盲区;
- 4) 设备转站测量过程中存在累计误差,系统误差无法避免。

本文将研究基于激光跟踪干涉仪的飞机测量场构建与应用,并与多种测量系统相互结合使用,满足复杂装配现场的多任务测量需求。基于设备组网建立大范围高精度测量场,20m测量范围内测量精度能够达到0.02mm。应用该测量场既能直接测量飞机大部件位置,也能够对激光雷达、激光间隙枪或激光跟踪干涉仪等其他测量设备进行高精度定位测量,从而满足新型飞机对大部段装配的高精度要求。

2 基于多台激光跟踪干涉仪组网的高精度测量场构建方法

激光跟踪干涉仪具有较高的测量精度,其测量与传输

核心为AIFM(绝对干涉仪),AIFM综合了干涉仪的测量速度与绝对测距仪的精度,实时操作系统具有良好的动态性能。以现场常用的Etalon激光跟踪干涉仪为例,如图1所示,其具有0.001 μm分辨率,长度测量不确定度约为0.2 μm + 0.3 μm/m,且激光跟踪干涉仪受温度、压力、湿度等因素影响非常小,测量精度基本不受环境影响,故本文利用Etalon激光跟踪干涉仪测长特性建立测量场。

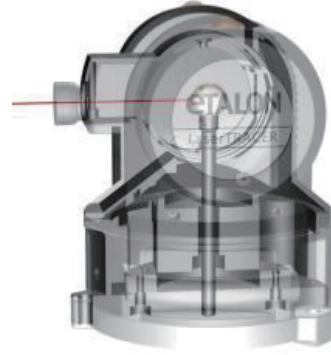


图1 激光跟踪干涉仪

建立测量场是指在测量环境相对稳定的基础上,使测量系统与测量产品的空间坐标系形成统一,其中包括测量系统的布站、转站点选取、测量数据采集和数据的转站预处理^[14]。本文测量场依据4台激光跟踪干涉仪搭建单个测量组网,如图2所示,激光跟踪干涉仪20m范围内单线测量最大误差为 $0.2 \mu\text{m} + 0.3 \mu\text{m}/\text{m} \times 20\text{m} = 6.2 \mu\text{m}$ 。激光跟踪干涉仪布局于图中 B_1, B_2, B_3, B_4 , B_1, B_2, B_3 位置设备测量出到点 P 的距离为 d_1, d_2, d_3 ,其中 B_1 坐标为 (x_1, y_1, z_1) 、 B_2 坐标为 (x_2, y_2, z_2) 、 B_3 坐标为 (x_3, y_3, z_3) 。

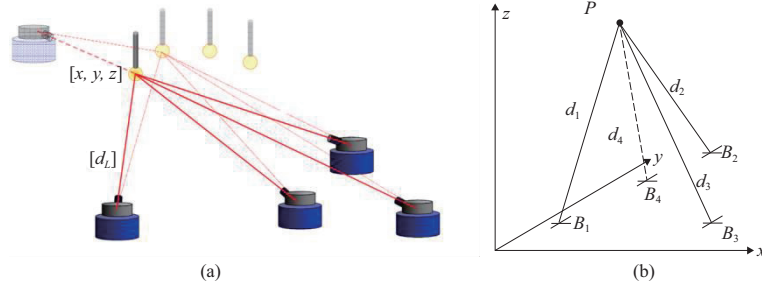


图2 测量场原理示意图

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = d_2^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

通过式(1),参考 B_1, B_2, B_3 空间位置,限制点 P 的 z 轴坐标, $z_p > \max\{z_1, z_2, z_3\}$ 或 $z_p < \min\{z_1, z_2, z_3\}$,即可求得点 P 坐标唯一解 (x, y, z) 。 B_4 空间坐标为 (x_4, y_4, z_4) ,点 P 到 B_4 距离为 d , B_4 位置设备到点 P 测量距离为 d_4 , $d_L = d - d_4$, d_L 为理论值与实际值的偏差,通过判断 d_L 大小,可以实时校准对其他3台设备进行自校准。4台设备间也

可以利用工装现有ERS点/TB点进行自校准,以实现测量设备高精度测量状态保证。

由于激光跟踪干涉仪的测量范围为0~20m,且测量场测量空间中一点同时需要4台激光跟踪干涉仪的测量数据,因此测量场的测量范围同样受到测量仪器的安装位置影响。本文考虑两种布局方式,分别为满量程安装测量布局、同侧安装测量布局。满量程安装4台激光跟踪干涉仪间的间距皆接近满量程,间距为20m,如图3所示。同侧安装测量布局激光跟踪干涉仪,在 x 方向间隔2m,高度 z 方向相差1m, y 方向相差1m,如图4所示。

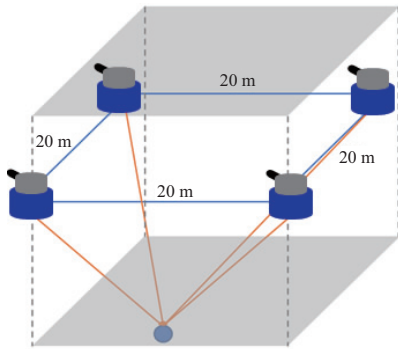


图3 满量程安装测量激光跟踪干涉仪示意图

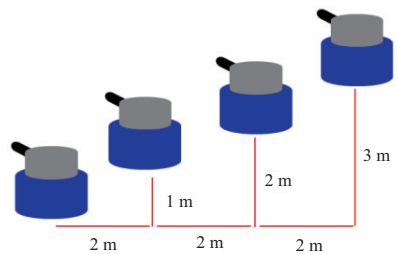


图4 同侧安装测量激光跟踪干涉仪示意图

对测量场布局进行可测点仿真,满量程安装测量仿真结果如图5所示,同侧安装测量仿真结果如图6所示。图中红色的点为激光跟踪干涉仪安装的4个位置,蓝色的点为空间中的测量点,满量程安装测量在z方向有最大的测量范围,达到27.88m,在x方向与y方向测量范围较小,为14.5m左右;同侧安装测量y方向有最大的测量范围,达到39.16m。在x方向与z方向测量范围较小,分别为33.85m与36.88m(因本刊为黑白印刷,有疑问可向作者咨询)。

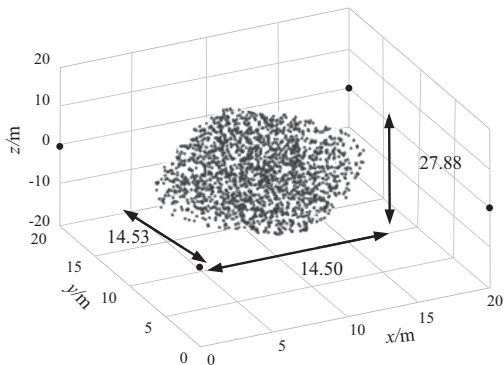


图5 满量程安装测量跟踪仪可测点分布示意图

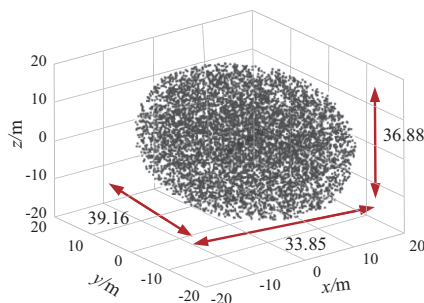


图6 同侧安装测量跟踪仪可测点分布示意图

计算目标(猫眼)在测量场20m范围内,激光跟踪干涉仪测量单线不确定度为6.2 μm,测量场通过自标定建立坐标系后,利用3个激光跟踪干涉仪的测量数据计算猫眼的测量不确定度,测量示意图如图7所示。

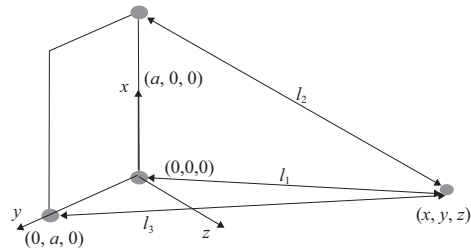


图7 测量场测量点示意图

通过公式可知,猫眼位置关于 l_1, l_2, l_3 的函数为

$$x = \frac{a^2 + l_1^2 - l_2^2}{2a}, y = \frac{a^2 + l_1^2 - l_3^2}{2a}, z = \sqrt{l_1^2 - x^2 - y^2} \quad (2)$$

通过对偏导,可得到 l_1, l_2, l_3 的不确定度传递系数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial l_1} = \frac{l_1}{a}, \frac{\partial x}{\partial l_2} = -\frac{l_2}{a}, \frac{\partial x}{\partial l_3} = 0, \frac{\partial y}{\partial l_1} = \frac{l_1}{a}, \frac{\partial y}{\partial l_2} = 0, \frac{\partial y}{\partial l_3} = -\frac{l_3}{a} \\ \frac{\partial z}{\partial l_1} = \frac{l_1 - \frac{a^2 + l_1^2 - l_2^2}{2a} \cdot \frac{l_1}{a} - \frac{a^2 + l_1^2 - l_3^2}{2a} \cdot \frac{l_1}{a}}{\sqrt{l_1^2 - x^2 - y^2}} \\ \frac{\partial z}{\partial l_2} = \frac{l_2}{a} \cdot \frac{a^2 + l_1^2 - l_2^2}{2a}, \frac{\partial z}{\partial l_3} = \frac{l_3}{a} \cdot \frac{a^2 + l_1^2 - l_3^2}{2a} \end{cases} \quad (3)$$

由于测量过程中的 l_1, l_2, l_3 的测量不确定度已知,且3个变量不相关,因此可得到猫眼位置 x, y, z 的合成不确定度:

$$\begin{cases} u(x) = \frac{\partial x}{\partial l_1} u(l_1) + \frac{\partial x}{\partial l_2} u(l_2) + \frac{\partial x}{\partial l_3} u(l_3) \\ u(y) = \frac{\partial y}{\partial l_1} u(l_1) + \frac{\partial y}{\partial l_2} u(l_2) + \frac{\partial y}{\partial l_3} u(l_3) \\ u(z) = \frac{\partial z}{\partial l_1} u(l_1) + \frac{\partial z}{\partial l_2} u(l_2) + \frac{\partial z}{\partial l_3} u(l_3) \end{cases} \quad (4)$$

以满量程的安装方式布置,取 $a = 20$ m,上式中 l_1, l_2, l_3 取值均为20 m,可知 $u(x) = 0.0088$ m, $u(y) = 0.0088$ m, $u(z) = 0.0062$ m。本文考虑到飞机形状对安装位置的限制以及对相应工装检测调整方便,结合测量范围,最终选用同侧安装激光跟踪干涉仪的方式构建测量场。

上述基于测量组网建立的测量场主要用于在大空间中仪器的定位,但是对于飞机大部件局部区域特征,如点、基准孔等的测量,需要通过激光雷达等设备进行近距离测量。激光雷达空间测量精度为 $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}/\text{m}$,在5 m范围内测量精度能够达到 $60 \mu\text{m}$ 。因此,利用激光雷达可实现飞机大部件的全覆盖测量,且可简便实现坐标系的统一,并保证精度能够达到要求。

3 基于高精度测量场的测量设备实时转站测量

测量场测量范围有限,且受到工装、设备等干涉,测量

场需与激光雷达、激光跟踪仪等测量设备组合使用,这些设备在移动或转站过程中标定。对于激光雷达坐标系的确定,可采用在激光雷达/激光跟踪仪上集成猫眼定位工装的方式来检测。工装上设置3个猫眼定位位置,重复定位误差0.005 mm;激光雷达每次转站后,将猫眼置于工装的3个位置,采用测量场对猫眼进行高精度测量,激光雷达对工件外形进行测量,测量数据转化到测量场坐标系下,如图8所示。

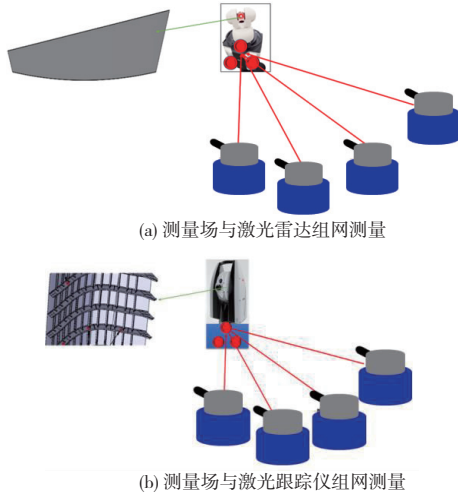


图8 测量场与激光雷达、激光跟踪仪组网测量

测量场与激光雷达/激光跟踪仪通过 ERS 点进行转站,进而实现坐标系统一。在进行坐标系统一时,理论上最少需要的测点数量是3个,通过增加测量的数量可以减小过程中的误差。在此以测点数量为3个进行计算。设3个测点在测量场坐标系下得到的坐标数据分别为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) 。以这3个测点建立测点坐标系(前提是3个 ERS 不在同一直线上)。以第1个测点为测点坐标系原点,以第1个和第2个测点连线所在直线为测点坐标系的 x 轴,以3个测点所确定的平面为 xy 平面,可进一步得到 y 轴方向。最后 z 轴方向可由下式得到: $(x_2-x_1, y_2-y_1, z_2-z_1) \times (x_3-x_1, y_3-y_1, z_3-z_1)$ 。

通过以上步骤,测点坐标系在测量场坐标系下的原点与方向数据都已求得,则可得到测点坐标系相对测量场坐标系的转化矩阵,设为 T_1 。同样的方法,设3个测点在激光雷达坐标系下得到的坐标数据分别为 (u_1, v_1, w_1) , (u_2, v_2, w_2) , (u_3, v_3, w_3) 。以这3个测点建立测点坐标系(前提是3个 ERS 不在同一直线上)。以第1个测点为测点坐标系原点,以第1个和第2个测点连线所在直线为测点坐标系的 x 轴,以3个测点所确定的平面为 xy 平面,可进一步得到 y 轴方向。最后 z 轴方向可由下式得到: $(u_2-u_1, v_2-v_1, w_2-w_1) \times (u_3-u_1, v_3-v_1, w_3-w_1)$ 。

通过以上步骤,测点坐标系在测量激光雷达坐标系下的原点与方向数据都已求得,则可得到测点坐标系相对激光雷达场坐标系的转化矩阵,设为 T_2 。最终,激光雷达坐标系相对于测量场坐标系的转换矩阵为: $T = T_1 \times T_2^{-1}$ 。则在激光雷达坐标系下测得的任一数据点 (x_0, y_0, z_0) ,将其转换为矩阵 $T_0 = [x_0, y_0, z_0]^{-1}$,转换到测量场坐标系下为

$T_0' = T \times T_0$,则在测量场坐标为 (x_0', y_0', z_0') 。基于该原理,可以将所有测量特征测量数据转换在同一坐标系下。

4 测量场组网应用

大尺寸空间高精度测量场主要应用在超大型复材成型模具制造检测、超大型复材加筋壁板/梁制造检测、大尺寸飞机部件装配、大型飞机整机表面喷涂定位等飞机制造过程中,本文主要从大尺寸工装制造检测、大尺寸飞机部件装配两种应用场景进行说明。

4.1 大尺寸工装基于测量组网高精度制造检测

大尺寸零件的气动外形、边缘轮廓、定位孔、长桁轴线等是设计及制造的控制特征,这些特征会从各个方面影响到飞机产品质量。大尺寸零件成形过程中极大地依赖于工装,本文针对大尺寸复材壁板工装建立测量场,各站位布局如图9所示,所需测量空间内测量距离和范围均满足测量需求。

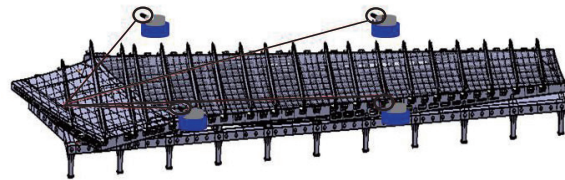


图9 大尺寸复材工装测量场布局图

数控加工工装时在型面对应 ERS 点位置调平基准小平面,调整公差为 ± 0.1 mm,记录调平基准小平面 z 值,为后续调平做依据。工装加工时设计给出的基准孔做为 TB 点位,在点位处推出基准平面,方便后续初步建立坐标系以及测量斜对角线距离。以工装上 TB 点、ERS 点校准测量场,建立飞机坐标系,激光跟踪仪测量型面及孔位精度、T-probe 测量线精度,利用测量场及测量设备建立测量组网,实现工装的高精度检测。最终实现工装型面及孔位测量精度为 ± 0.02 mm,零件线/基准线测量精度为 ± 0.02 mm。

4.2 大飞机机翼总装站位基于测量组网高精度装配

根据目前的设计需求和制造需求,在部总装配过程中检测以下两个方面的特征。

设计需求:钉头齐平度、蒙皮对缝间隙及阶差、部件气动外形。

制造需求:水平测量点、工艺测量接头、交点孔、工装定位孔等特征;骨架轮廓、蒙皮内外型、蒙皮轮廓等型面特征。

高精度测量是产品特征高精度保证的基础,测量场能够对装配站位具体负责测量设备进行准确定位,进而满足负责装配现场的多任务测量需求。

本文针对大飞机机翼总装站位建立测量场,由于机翼尺寸大、测量特征多,在机翼翼盒两侧分别建立两个测量

(下转第77页)

参考文献:

- [1] 沈勇. 碳/碳固体火箭发动机柔性喷管热及热-结构耦合作用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [2] 曾涛,姜黎黎. 三维编织复合材料力学性能研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):34-41,47.
- [3] 宋云飞,杜宇. 三维编织复合材料力学性能研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(10):104-109.
- [4] 苏蕴荃,陈昊,侯传涛,等. 基于单胞模型的三维四向编织复合材料力学性能研究[J]. 强度与环境,2022,49(4):34-41.
- [5] 赵文斌,田谋锋,姚亚琳,等. 法向增强预制体/酚醛扩张段RTM制备技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(3):65-69.
- [6] 谭煥成,覃文源,刘升旺,等. 三维编织复合材料细观几何建模及动力学性能的研究进展[J]. 机械工程材料,2021,45(8):1-7.
- [7] 李翠敏,阎建华,刘丽芳,等. 三维编织碳纤维复合材料剪切性能研究[J]. 纤维复合材料,2014,31(2):45-49,44.
- [8] TANG Y L,ZHOU Z G,PAN S D,et al. Mechanical property and

failure mechanism of 3D Carbon - Carbon braided composites bolted joints under unidirectional tensile loading[J]. Materials & Design (1980-2015),2015,65:243-253.

- [9] 胡美琪,孙宝忠,顾伯洪. 三维编织复合材料冲击损伤分布的温度和结构效应[J]. 中国科学:技术科学,2021,51(1):108-118.
- [10] 韩振宇,梅海洋,付云忠,等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料细观结构研究进展[J]. 材料工程,2018,46(11):25-36.
- [11] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术,2017,60(19):78-85.
- [12] 荆云娟,赵领航,张元,等. 变截面三维编织预制件增减纱技术与力学性能研究概述[J]. 高科技纤维与应用,2018,43(3):51-57.
- [13] 马明,张晨辰,张一帆. 三维四向编织复合材料结构的计算机仿真[J]. 天津工业大学学报,2019,38(6):45-51.

收稿日期:2022-12-07

(上接第73页)

场,各激光跟踪干涉仪的位置如图10所示。在该站位布置下,所需测量空间内激光跟踪干涉仪的测量距离、范围经过检验都符合要求。

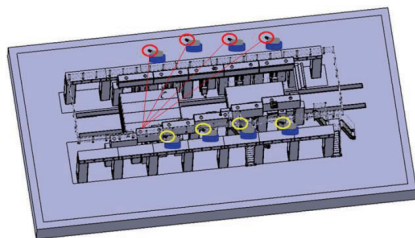


图10 大飞机机翼总装站位测量场布局图

产品测量前,对测量场进行自标定及飞机坐标系拟合。已知工装装配过程中依据飞机坐标系选择相应TB点实现工装的高精度定位,本文利用工装上的TB点,使反射镜在若干不同TB点停留测量,对测量场进行自标定,计算出各台跟踪仪的相对位置并确立测量长坐标系。在机翼翼盒入位前,使反射镜在若干ERS点及TB点停留测量,利用测量场精确测量各ERS点位置,建立飞机坐标系,建立测量场坐标系、飞机坐标系和机床坐标系三者之间的转换关系。

翼盒主要测量特征为机翼气动外形、骨架外形、梁及肋板位置等,这些测量特征依据激光雷达进行测量。首先利用激光雷达测量已用测量场标定的ERS点,确定激光雷达坐标系与测量场坐标系的转换关系,然后再利用激光雷达实现相关特征的测量,并转换到统一坐标系下,实现骨架、梁、壁板等的高精度定位。依据该测量场在大飞机翼盒的高精度装配的应用,验证了20m测量范围内测量精度能够达到0.02mm,进而保证飞机翼盒气动外形精度 $\leq 0.4\text{mm}$,蒙皮对缝阶差精度 $\leq 0.1\text{mm}$,蒙皮对缝间隙测量精度 $\leq 0.3\text{mm}$ 。

5 结语

本文依托4台激光跟踪干涉仪长度方向的高精度测量建立测量组网,测量组网结合其他测量设备形成统一坐标系下的高精度测量场,形成了以下结论:

1) 基于激光干涉仪组网构建的测量场,能够实现20m范围内高精度测量,测量精度可以达到0.02mm,可以实现大尺寸空间的高精度测量;

2) 测量组网与激光雷达、激光跟踪仪等测量系统经过测量数据转换,在同一坐标系下处理测量数据,简化数据处理、降低累积误差;

3) 测量设备在测量场中移动,测量数据实时转换,打破传统测量站位固定局面,降低产品/工装遮挡而无法全面检测的风险,有效实现产品高精度测量。

参考文献:

- [1] 梅中义,朱三山,杨鹏. 飞机数字化柔性装配中的数字测量技术[J]. 航空制造技术,2011,54(17):44-49.
- [2] 郭洪杰. 浅谈数字化测量技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术,2011,54(21):26-29.
- [3] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术[J]. 航空制造技术,2010,53(18):52-54.
- [4] 李洸泉,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,2010,53(23):46-48,59.
- [5] 朱三山,梅中义. 飞机数字化装配测量系统研究[J]. 现代制造工程,2011(8):95-99.
- [6] 邹冀华,周万勇,邹方. 数字化测量系统在大部段对接装配中的应用[J]. 航空制造技术,2010,53(23):52-55.
- [7] 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,2011,54(21):72-75.
- [8] MUELANER J, MAROPOULOS P G. Large scale metrology in aerospace assembly[C]// 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, East Avon County England: University of Bath, 2008.
- [9] 于成浩,董岚,柯明,等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究[J]. 测绘科学,2008,33(2):42-44.
- [10] 于成浩,柯明,赵振堂. 提高激光跟踪仪测量精度的措施[J]. 测绘科学,2007,32(2):54-56,178.
- [11] 于成浩,柯明. 基于激光跟踪仪的三维控制网测量精度分析[J]. 测绘科学,2006,31(3):25-27,3.
- [12] 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.
- [13] 朱永国,黄翔,李洸泉,等. 飞机装配高精度测量控制网精度分析与构建准则[J]. 中国机械工程,2014,25(20):2699-2704.
- [14] 朱峻可,李丽娟,林雪竹. 激光雷达测量系统的测量场规划研究[J]. 激光技术,2021,45(1):99-104.

收稿日期:2022-12-07