

引文格式: 赵建国, 台春雷, 刘哲, 等. 飞机装配大尺寸多系统测量场构建及应用[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 63-67, 74.

ZHAO Jianguo, TAI Chunlei, LIU Zhe, et al. Establishment and application of large-volume multi-system measurement field for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 63-67, 74.

飞机装配大尺寸多系统测量场构建及应用*

赵建国, 台春雷, 刘哲, 王崇, 白继鹏

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 针对飞机装配大尺寸、高精度、兼容性强、扩展性好、快速组网的测量技术需求, 开展面向飞机装配的大尺寸多系统测量基准场构建技术研究, 提出基准点优化设计原则, 采用基于激光跟踪仪的多站位冗余测量长度约束算法, 构建兼容飞机装配现场设备的三维精密测量基准场, 并通过试验对比验证了测量基准场的标定精度。最后通过典型应用案例阐述了在飞机装配过程中大尺寸多系统测量基准场的应用效果, 促进了飞机装配测量工艺改进, 提高了飞机装配质量和生产效率。

关键词: 飞机装配; 多系统; 测量场构建; 快速组网; 测量基准

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.05.063



赵建国

正高级工程师, 主要研究方向为数字化测量与柔性装配。

新一代飞机在性能、研制效率等方面均有大幅提高, 隐身和长寿命作为重要指标, 对机体结构、气动外形、表面间隙阶差等质量特性都有很高的要求。传统的模线、样板、量规等

模拟量协调方式难以满足新一代飞机研制需求。随着数字化技术的发展, 三维测量技术已融入飞机装配的各个环节, 应用模式由交付质量验收检测向工艺质量过程控制转变。飞机尺寸大, 测量需求差异较大, 装配现场需要多测量系统协同工作, 亟须发展大尺寸、高精度、兼容性强、扩展性好、组网快速的整体测量场构建技术, 为保证飞机装配质量奠定基础。

飞机制造一般为多品种小批量, 甚至是单件生产, 传统模拟量协调制造方法存在质量稳定性差、效率低等问题, 随着数字化制造技术的发展, 世界各国都将数字化制造作为发展方向, 而数字化测量作为重要支撑技术更是必不可少。基于产品单一数据源的数字量协调体系是现代飞机制造技术特点, 更是飞机装配的发展方向。装配过程工序多, 飞机零部件在各工序间流转, 数字测量技术为保

证飞机零部件的精确定位提供了基础保障^[1]。在国外飞机制造企业, 军机如 F-22 和 F-35 战机, 民用飞机如波音 787、A380 等在装配过程中, iGPS、激光跟踪仪、激光雷达等数字化光学测量技术获得了成功应用, 大大提高了飞机装配精度和自动化水平, 显著缩短了飞机装配周期。近年来国内引进大量先进数字化测量设备, 相应的应用技术得到了长足发展, 如为满足差异化测量需求的飞机复杂装配件的协同测量技术^[2]、基于激光跟踪仪 EMSCON 的二次开发^[3]等。飞机尺寸大, 局部精度要求高, 建立一个大尺寸、高精度的全局测量场至关重要。国内外开展了大量研究, 如大尺寸整体测量场的构建与误差评定^[4-6]。多系统协调测量方面, 文献[7-8]综合考虑测量仪器的适应范围、测量不确定度、测量经济性指标, 针对产品测量需求, 提出了合理

* 基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2014ZX04001081)。

的测量仪器选型方法和多系统组合应用方法。在三维测量场标定方面, USMN (Unified spatial metrology network) 技术基于激光跟踪仪的测量原理及测量不确定度分析, 通过试验研究了角度和距离对测量误差分布的影响, 通过平差优化算法, 提高三维测量场的标定精度^[9-11]。

针对飞机装配现场对大尺寸、高精度、多系统协同的测量需求, 基于激光跟踪仪开展飞机装配大尺寸多系统测量场构建技术研究, 建立适应大型部件装配的整体测量场, 为飞机数字化装配提供基准统一的测量信息数据, 对保证数据的顺利传递和高效利用, 促进飞机装配工艺技术的不断完善、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。

1 测量场构建

飞机具有较大尺寸 (22m×16m×6m), 测量特征包括点、线、面, 测量精度和尺度要求差异较大, 装配现场测量设备种类繁多, 通过开展基准点优化、测量基准场兼容性和基准点标定等技术研究, 综合考虑测量精度、测量效率和测量成本, 搭建覆盖装配工作区域的统一测量基准网, 兼顾多种数字化测量设备, 满足飞机装配对大尺寸、高精度、多系统协同、扩展性好、兼容性强和快速组网的测量需求, 为保证飞机装配质量和效率奠定基础。

1.1 基准点优化设计

测量基准点设计应综合考虑测量精度、测量范围、待测部件结构特点和测量仪器等因素, 开展测量点布置工艺仿真与优化设计。工艺规划主要工作内容包括基准点选取、测量仪器站位设计、测量工艺仿真与优化等, 具体如下。

(1) 基准点选取原则。

a. 基准点应设置在测量专用地基或固定梁、柱上, 测量基准点应稳定、抗震和通视性好, 易被测量仪器

识别等;

b. 基准点构成的测量空间应将所有测量点位包含在内 (可包络飞机总体结构);

c. 基准点布置密度应综合考虑测量工艺和测量设备需求, 保证单机单次建站可供选择基准点数量不少于4个, 且被选用基准点不得共线或共面。

(2) 测量仪器站位设计。在能够满足测量需求的前提下, 尽量采取最少的站位数量, 以减轻测量仪器转站误差对测量精度的影响。

(3) 测量工艺仿真与优化。根据飞机装配对测量工艺需求, 综合考虑各测量仪器原理、工作范围、测量工位、空间布置和测量可达性等, 依据上文(1)和(2)中原则初步确定基准点和测量站位规划方案, 建立测量工艺模型, 以测量精度、操作方便性和经济性等为优化指标, 通过测量工艺过程仿真, 对测量基准点和站位布局方案进行迭代优化, 最终确定基准点优化设计方案, 如图1所示。

1.2 测量基准场兼容性设计

装配现场数字化测量仪器种类繁多, 如 iGPS、激光跟踪仪、激光雷达、三维扫描仪、工业相机、关节臂和光笔等, 每种测量仪器都有其独特的原理、适用范围, 包括接触式和非接触式, 相对式和绝对坐标测量等。测量

场构建应系统分析设备应用特点和适应范围, 充分发挥各种测量手段的优势, 优化集成测量方案, 兼顾测量精度、效率和成本, 对现场测量仪器具有较高的兼容性, 实现测量基准的统一, 保证各系统测量数据高效交互。

iGPS、激光跟踪仪和激光雷达为空间点测量, iGPS 和激光跟踪仪的接收器或反射镜可选 1.5inch (1 inch=2.54cm) 标准球, 如图 2 (a) 所示, 球心为测量反馈值, 激光雷达可扫描 1.5inch 标准球球面, 通过拟合反馈球心值。工业相机和扫描仪采用相机成像, 为面测量, 可测量图 2 (b) 反光标识, 标识为圆形, 测量反馈圆形形心坐标值 (形心与球心重合)。关节臂和光笔为接触式点测量, 可通过测量 1.5inch 标准球球面, 通过拟合反馈球心值。

综上所述, 结合各设备测量反馈值特点, 测量基准点选为采用 1.5inch 球心, 不同仪器配备图 2 (a) 和 (b) 式测量部件和标准 1.5inch 圆球, 配合图 2 (c) 式基准座, 实现坐标基准的统一。对于空间狭小结构, 不便于安装 1.5inch 测量部件时, 可采用图 2 (d) 式角度反光标识, 但圆形标识形心与底座偏移量与 1.5inch 测量部件一致。

1.3 测量基准场标定方法

在飞机装配现场, 测量基准场标

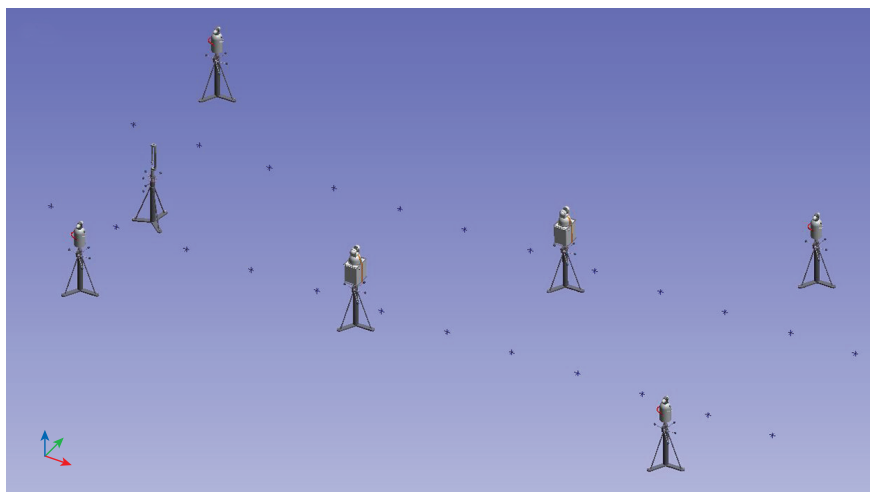


图1 测量工艺规划与仿真

Fig.1 Measurement process planning and simulation

定仪器一般采用激光雷达和激光跟踪仪等,可单独或多种仪器联合使用,与测量设备的应用原理无关,下文以装配现场多见的激光跟踪仪为例,阐述标定方法。激光跟踪仪为球坐标测量系统,基于角度传感和测长技术,其长度量值利用激光干涉测距读取,激光干涉精度高可直接溯源至激光波长,对整体测量误差影响较小。水平角和俯仰角采用两个角度编码器测量,在测量线的切向产生较大误差,测量不确定度与距离成正比,是激光跟踪仪坐标测量主要误差源。大型部件装配现场,对精度要求不高的任务,三维测量场标定一般由激光跟踪仪直接测量获取。激光跟踪仪 20m 距离测量不确定度达到 0.2mm (现场测试经验值),对于高精度测量场标定,无法满足测量基准场的高精度标定需求。

利用激光跟踪仪内置的激光干涉仪测长精度高、现场使用方便的优点,基于多站位冗余测量长度约束方法,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,可降低测角误差对总体标定精度的影响。如图 3 所示,通过跟踪仪在多个测量站位(分布在空间不同位置)对标定现场的多个测量基准点进行测量,利用基准点坐标的不变性(基准点固定不变)及高精度长度测量值(读取激光跟踪仪长度值)建立测量误差方程,通过优化算法解算基准点空间坐标,从而降低跟踪仪测角误差影响,最终实现和跟踪仪干涉测长精度相对应的精密三维测量场精度,以此提高测量基准网标定精度。

基准点分布在不同高度层次上,利用激光跟踪仪在 m 个站位对 n 个基准点进行测量,逐个站位记录实测数据。激光跟踪仪采用球坐标模式,基于实测数据提取长度测量值 l 、水平角测量值 θ 和垂直角测量值 φ 。建立测量模型的约束方程为

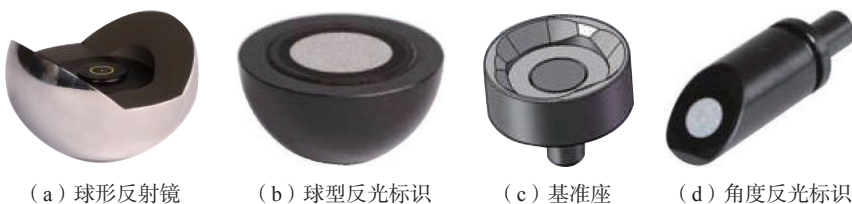


图 2 基准点标识与基座
Fig.2 Datum mark and base

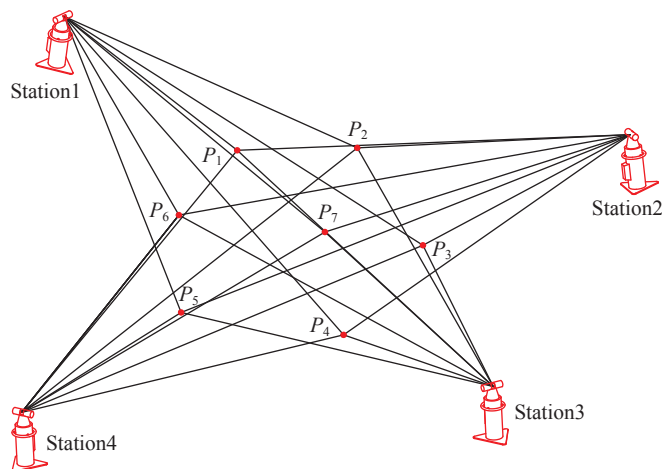


图 3 多站冗余测量
Fig.3 Multi station redundant measurement

$$\begin{cases} \Delta l_{ij} = l_{ij} - l_{ij}^0 \\ \Delta \theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^0 \\ \Delta \varphi_{ij} = \varphi_{ij} - \varphi_{ij}^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, l_{ij}^0 、 θ_{ij}^0 、 φ_{ij}^0 为激光跟踪仪在站位 i 对基准点 j 的测量值的实测值 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。 l_{ij} 、 θ_{ij} 、 φ_{ij} 为基准点 j 在站位 i 坐标系下的测量值的最优值,由基准点 j 的三维坐标的最优值 $p_j=(x_j, y_j, z_j)$ 、站位 i 到全局坐标系的旋转角 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 和平移向量 T_i 计算得到。

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R_i^T (p_j - T_i) \quad (2)$$

$$\begin{cases} l_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} \\ \theta_{ij} = \pm \cos^{-1} \left(\frac{x_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) \\ \varphi_{ij} = \cos^{-1} \left(\frac{z_{ij}}{l_{ij}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i \cos \beta_i & \cos \gamma_i \sin \beta_i \sin \alpha_i - \sin \gamma_i \cos \alpha_i \\ \sin \gamma_i \cos \beta_i & \sin \gamma_i \sin \beta_i \sin \alpha_i \cos \gamma_i \cos \alpha_i \\ -\sin \beta_i & \cos \beta_i \sin \alpha_i \\ \cos \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i + \sin \gamma_i \sin \alpha_i \\ \sin \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i - \cos \gamma_i \sin \alpha_i \\ \cos \beta_i \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此,整体目标方程为

$$\begin{aligned} & \text{find}(p_1, \dots, p_n, \text{outPara}_2, \dots, \text{outPara}_m), \\ & \min \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^n (w_l \Delta l_{ij}^2 + w_\theta \Delta \theta_{ij}^2 + w_\varphi \Delta \varphi_{ij}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, w_l 、 w_θ 和 w_φ 是长度约束方程和角度约束方程的权重。由于激光跟踪仪的测长精度高于测角精度,根据现场情况,建立各个测量站的测量模型,得到各测量站的协方差矩阵和雅可比矩阵,按矩阵加权线性最小方差最优融合准则,求取长度约束方程和角度约束方程的权重。

此外,激光跟踪仪的测量不确定度也有差别,特别是选用不同品牌的仪器,首先应校准仪器,确定每台设备自身的不确定度。在寻优迭代过程中,加权最小二乘法较为常用,本

文采用 Levenberg-Marquardt 算法,属于非线性最小二乘算法,兼具梯度法和牛顿法的优点,即收敛速度快、可全局收敛。因此,采用 Levenberg-Marquardt 算法对整体目标方程进行解算,从而得到基准点高精度的三维坐标,构建三维精密控制场。

2 测量场精度验证及应用

数字化测量技术不仅是飞机装配质量控制的重要手段,更为现场自动化设备提供闭环控制数据支持,利于在飞机制造过程中形成完整的数据链,对修正质量偏差、促进飞机制造工艺迭代优化有重要作用。测量基准场是保证飞机装配质量的基础,下文对精度验证和工程应用情况进行介绍。

2.1 标定精度验证

飞机大部件装配现场对测量范围的需求通常大于 20m,激光跟踪仪所用标准尺不超过 2m,无法验证测量基准网标定精度。激光干涉仪测长精度为 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$,大型设备精度评价应用较多,通过与激光干涉仪对比,验证测量基准网标定精度。

利用大型数控机床导轨(超过 20m),导轨直线精度较高,如图 4 所示,采用 4 台激光跟踪仪和 1 台激光

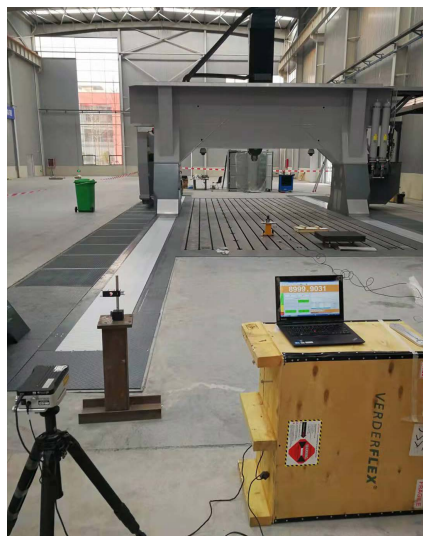


图 4 精度验证

Fig.4 Accuracy verification

干涉仪,特制仪器支座,将激光干涉仪反射镜和激光跟踪仪 1.5inch 靶球集成在仪器支座上,相对位置固定,并在现场预先布置好基准点球座。现场温度为 $(23\pm 1)^\circ\text{C}$,湿度 70%。标定前,准备激光干涉仪和激光跟踪仪使其具备工作状态,将仪器支座放置在机床床身上,放置好反射镜和靶球,将机床运行至一端边界处,调整激光干涉仪,并记录为初始位置,同时各激光跟踪仪测量 1.5inch 靶球记录实测值。然后移动机床床身,仪器支座随床身一起运动,激光干涉仪和激光跟踪仪再次测量,记录当前数据,以激光干涉仪两次测量差值作为标准长度。激光跟踪仪完成各基准点测量后,通过多站位冗余测量长度约束算法,实现测量基准场的标定,提取出与激光干涉仪集成的靶球坐标值,计算两点间距离,并与激光干涉仪得到的标准长度对比,验证测量基准场标定精度。

激光干涉仪得到的机床两次位置距离标准长度为 18000.035mm,相应靶球解算得到的距离为 18000.077mm,误差为 0.042mm(据工程经验,激光跟踪仪不经优化测量误差约为 0.2mm),证明标定精度显著提高,满足飞机装配使用需求。

2.2 多系统测量应用

飞机装配从零组件、段件、部件、全机对合、总装各工序均离不开数字化测量,测量特征包括交点、K 孔、框梁轴线、重要型面、气动外形、波纹度、间隙和阶差等,测量特征分布在机身各处,需要多种测量设备进行数据采集。为开展质量评价工作,以往通过人工处理将大量数据统一至飞机坐标系下,存在效率低、转换精度低等问题。整体测量基准场的建立,便于多设备的协同工作,且测量坐标系唯一,节约了人工成本,提高了坐标转换精度,大尺寸多系统测量基准场的典型应用场景如下。

(1) 照相测量长度校准。照相

测量操作简单,对现场环境要求较低,一般用于机身气动外形测量。照相测量利用相机拍摄被测物体的图像,建立被测物体与相机之间的相对位置关系,通过对不同位置图像进行解算,从而获得被测物体表面的三维信息。单幅图像属于二维测量,由于缺少长度约束,大尺寸测量精度受限。借助高精度的测量基准场,配合球形反光标识(图 2(b)),可为照相测量提供多方向的长度约束,测量误差可控制在 0.2mm 以内,显著提高了机体气动外形的测量精度。

(2) 扫描数据融合。三维扫描测量比照测量精细,可用于评价间隙、阶差和气动外形,但限于扫描幅面限制,大尺寸测量需要进行数据拼接,测量时利用光学跟踪系统确定扫描仪空间位置,完成扫描仪的精确定位,进而实现多幅图像的融合。为保证测量精度,光学跟踪系统一般工作范围不超过 5m,测量过程需要多次转站,测量精度损失较大。基于高精度的测量基准场,光学跟踪系统能够快速建立飞机坐标系,而且显著降低了多次转站误差累积的影响,经工程测试,不同区域扫描数据融合精度不低于 0.1mm。

(3) 大部件对接调姿。飞机大型部件对接,由于部件尺寸较大,测量范围超过了 20m,为保证对接精度,测量工艺需结合产品装配结构要求,在工艺准备期间通过大量模拟仿真,确定测量站位和工艺测量点布局,对合过程中保证激光跟踪仪位置固定,一旦出现位置变化,两对合部件需重新进行调整。在形成高精度的测量基准场后,测量基准点布置在工作现场四周,如图 5 所示,在测量基准场范围内激光跟踪仪转站误差可有效控制在 0.05mm 以内,显著提高了测量设备的使用灵活性,降低了现场返工率。

(4) 关键传感器数据修正。如航炮校靶、飞参传感器等修正,需飞

机结构装配完成后在总装阶段进行,以往采用大量工装和支架,将飞机调整至准确位置,生产准备周期长,而且调整过程费时费力。通过上述测量基准场构建技术,将基准点布置在飞机关键特征上,如图6所示,各传感器修正时,利用激光跟踪仪等仪器快速恢复飞机坐标系,并为各传感器调整提供闭环控制数据。调整过程无需调整飞机姿态,而且省去了大量工装和支架,数据修正时间缩短70%以上,调整精度不低于0.1mm。

3 结论

(1)开展面向飞机装配的大尺寸多系统测量基准场构建技术研究,提出了基准点优化设计原则,提高了测量基准场对各数字化测量仪器的

兼容性,基于多站位冗余测量长度约束方法,采用激光跟踪仪对飞机装配现场测量基准场进行标定,得到基准点高精度的三维坐标,构建了三维精密控制场。

(2)设计了大尺寸多系统测量基准场标定精度的验证试验方案,通过与激光干涉仪对比,测量不确定度可控制在0.05mm以内,验证了大尺寸多系统测量基准场构建技术的可行性。

(3)以照相测量长度约束、扫描数据融合、大部件对接调姿和关键传感器数据修正为例,阐述了大尺寸多系统测量基准场在飞机装配过程中的应用,验证了技术的有效性,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。



图5 大部件对接工艺试验
Fig.5 Butt joint process test of large parts



图6 校靶过程的数字化测量
Fig.6 Digital measurement of target calibration process

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.

MEI Zhongyi, ZHU Sanshan, YANG Peng. Digital measurement of aircraft digital flexible assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(17): 44-49.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 林嘉睿,郑继贵,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.

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

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

[7] CAI B, MAROPOULOS P, GUO Y, et al. Large volume measurability analysis for early design[C]//5th International Conference on Digital Enterprise Technology(DET08). Bath, 2008.

[8] MUELNER J E, CAI B, MAROPOULOS P G. Large volume metrology instrument selection and measurability analysis[C]//Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Hong Kong, 2010.

(下转第74页)

Measurement Uncertainty Evaluation of Turbine Nozzle Throat Area Measured by Coordinate Measurement Machine

WANG Zhenxing, FAN Mingzheng, ZHANG Shengjun, CAO Wei

(AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 201306, China)

[ABSTRACT] For the shortage of the current study on measurement uncertainty evaluation of turbine nozzle throat area measured by coordinate measurement machine (CMM), a measurement uncertainty evaluation model of turbine nozzle throat area measured by CMM was proposed by analyzing measurement procedure and principle. Finally, measurement uncertainties of single throat area and area of all throat in circle were evaluated according to a measurement case. The evaluation result shows the CMM method could meet the design requirement of turbine nozzle throat area.

Keywords: Throat area; Measurement uncertainty; Coordinate measurement machine (CMM); Commercial aero-engine; Evaluation method

(责编 阳光)

(上接第 67 页)

[9] 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, 33(2): 7-11, 23.

MA Liqun, CAO Tieze, WANG Jihu, et al. Discussion on inspecting the assembling components by using large volume metrology instruments[J]. Metrology & Measurement

Technology, 2013, 33(2): 7-11, 23.

[10] U.S. Department of Commerce. Performance evaluation of laser based spherical coordinate measurement systems: NIST. ASMEB 89. 4.19—2006[S]. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, 2006.

[11] 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.

Establishment and Application of Large-Volume Multi-System Measurement Field for Aircraft Assembly

ZHAO Jianguo, TAI Chunlei, LIU Zhe, WANG Chong, BAI Jipeng

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

[ABSTRACT] According to the measurement technology requirements of aircraft assembly for large-volume, high precision, strong compatibility, good expansibility and fast networking, the research on establishment technology of large-volume multi-system measurement field for aircraft assembly is carried out, the principle of measuring reference optimization design is proposed and the multi station redundant measurement length constraint algorithm is adopted based on laser tracker. A 3D precision reference measurement field compatible with aircraft assembly equipment is constructed, and the calibration accuracy of the reference field is verified by experimental comparison. Eventually, through a typical application case, this paper expounds the construction technology of large-volume multi-system measurement field in the process of aircraft assembly, which promotes the improvement of aircraft assembly measurement technology.

Keywords: Aircraft assembly; Multi-system; Establishment of measurement field; Fast established measure net; Measuring reference

(责编 阳光)