

# 飞机大部件装配外形数字化组合测量方法

李五朋<sup>1</sup>, 田锡天<sup>1</sup>, 耿俊浩<sup>1</sup>, 赵东平<sup>2</sup>, 张敏<sup>1</sup>

( 1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

2. 西安航空学院飞行器学院, 西安 710077 )

**[摘要]** 飞机装配部件外形尺寸大、曲面形状复杂, 型面测量数据量大。现有的单一测量设备测量精度和效率之间的矛盾突出。为此, 构建包含激光跟踪仪、关节臂测量仪和摄影测量的数字化组合测量系统。基于坐标变换将多测量站点的测量信息统一到全局坐标系下, 通过测量数据模型与理论模型对比, 获得部件外形测量结果, 在保证测量精度的条件下, 提高型面测量效率。以飞机内襟翼上翼面装配过程外形精度保证为例, 验证了所提方法的正确性。

**关键词:** 大尺寸测量; 摄影测量; 组合测量; 激光跟踪仪; 多测量数据融合

## Digital Combined Measuring Technology of Aircraft Large Components Outline

LI Wupeng<sup>1</sup>, TIAN Xitian<sup>1</sup>, GENG Junhao<sup>1</sup>, ZHAO Dongping<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aircraft Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China )

**[ABSTRACT]** The aircraft assembly components are typical for large size and complex shape, which makes it need large data for outline inspection. The contradiction between the measuring accuracy and efficiency of the existing single measuring device or measurement field is outstanding. Thus, the digital combined measurement system, including a laser tracker, an articulated arm measuring machine and photogrammetric system, is constructed. Based on the coordinate transformation, the measurement information of multiple stations is unified into the global coordinate system. The measurement results of the component shape are obtained by comparing the measurement data model with the theoretical model, improving the measurement efficiency of the profile surface under the condition of ensuring the measurement accuracy. Taking the assurance of shape accuracy of the flap assembly process for an example, the validity and correctness of the proposed method are verified.

**Keywords:** Large-scale metrology; Photogrammetry; Combined measurement; Laser tracker; Multi-type data fusion

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.080

飞机装配是保证飞机外形精度的重要环节, 提高飞机部件装配外形检测水平对于提升飞机制造质量具有重要意义<sup>[1]</sup>。机身、机翼是构成飞机整体的主要部分, 通过外形检测及时发现、定位飞机机身与机翼的装配质量问题, 对于缩短飞机装配周期、减少飞机装配工作量、提高飞机装配效率具有重要意义。由于飞机外形具有曲面形状复杂、尺寸大的特点, 飞机外形检测困难, 传统利用卡板等模拟量测量方式只能定性判别表面质量, 无法准确定位误差位置及误差量, 难以满足数字化装配的要求<sup>[2]</sup>。所以, 探寻一种适合于飞机大部件外形的数字化测量方式将成为提升飞机制造质量、缩短飞机制造周期的必然选择。

针对传统装配测量方式无法满足现代飞机装配测

量要求的问题, 国内学者对于飞机外形数字化测量方法进行了许多研究。韩清华等<sup>[3]</sup>利用激光跟踪仪通过转站的方式, 实现了飞机方向舵外形测量, 并通过 CATIA 进行了模型重建。孙中升<sup>[4]</sup>、王巍等<sup>[5]</sup>研究了关节臂测量仪在大尺寸测量中的应用模式, 并完成了复杂发动机叶片型面测量。陈彦<sup>[6]</sup>、王梅等<sup>[7]</sup>将近景工业摄影测量系统与激光跟踪仪结合, 相机拍照测量, 激光跟踪仪测量公共基准点, 通过公共基准点拟合实现测量坐标系转换, 完成了某型飞机后机身对接区域外形轮廓测量。景喜双等<sup>[8]</sup>将激光跟踪仪与关节臂测量仪组合, 关节臂测量仪分块扫描测量, 激光跟踪仪测量公共基准点, 实现多块点云拼接及测量坐标系转换, 完成了飞机前缘壁板组件外形测量。

单一的测量设备具有自身的局限性,例如激光跟踪仪虽然测量范围大、精度高,但测角精度、测量效率等问题限制了其在复杂部件全尺寸检测上的应用<sup>[9-10]</sup>;工业摄影测量系统携带方便、受环境影响小,但由于标志点离散,对于复杂型面容易遗漏特征信息;关节臂测量仪可以进行扫描测量,获取大量数据,对于曲率变化小的简单表面,过多的数据会增加计算量,增加数据处理时间。单一测量设备与激光跟踪仪组合的测量方式虽然可以完成大尺寸测量,突破测量尺寸的限制,但获得的数据存在偏少或偏多的极端情况,因此本文构建包含激光跟踪仪、近景工业摄影测量与关节臂测量仪3种设备的数字化组合测量系统,根据飞机大部件装配外形公差要求确定测量设备。通过任务分配构建测量流程,进行测量数据处理,实现多数据融合,提高飞机大部件装配件外形质量检测效率。

## 1 飞机大部件装配外形精度组合测量系统构建

现有的主要外形测量方法及其对比如表1所示,其中 $L$ 为激光跟踪仪与测点的距离, $l$ 为相机与标志点的距离。激光跟踪仪测角精度低,适用于单点测量;近景工业摄影测量系统、关节臂测量仪测量精度高,但测量范围小;近景工业摄影测量系统与激光跟踪仪组合的测量方法虽然测量范围大、效率高,但不适用于复杂型面测量;关节臂测量仪与激光跟踪仪组合测量数据量大、效率低。因此,可以构建包含关节臂测量仪、近景摄影测量系统、激光跟踪仪的组合测量系统,完成复杂、大尺寸型面的外形测量。

根据飞机部件装配测量过程中各部分功能不同,将组合测量系统划分为测量设备、数据处理软件以及计算机控制平台3部分,如图1所示。测量设备由激光跟踪仪、关节臂测量仪和近景工业摄影测量系统组成,根据精度要求,将飞机部件外形分块,对于精度要求高、需要

表1 常用外形测量方法

测量方法	测量精度	测量效率	缺点
激光跟踪仪测量(AT901-B)	$15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$	低	测角精度低
近景工业摄影测量系统测量(V-STARS/S8)	$4\mu\text{m}+4\mu\text{m}/\text{m}$	高	测量范围小
关节臂测量仪测量(Romer7725)	$17\mu\text{m}$	低	测量范围小
激光跟踪仪(AT901-B)、关节臂测量仪(Romer7725)组合测量	$[389+(15+6L)^2]^{1/2}\mu\text{m}$	低	数据量过大
激光跟踪仪(AT901-B)、近景工业摄影测量系统(V-STARS/S8)组合测量	$[(4+4l)^2+(15+6L)^2]^{1/2}\mu\text{m}$	高	数据量过少

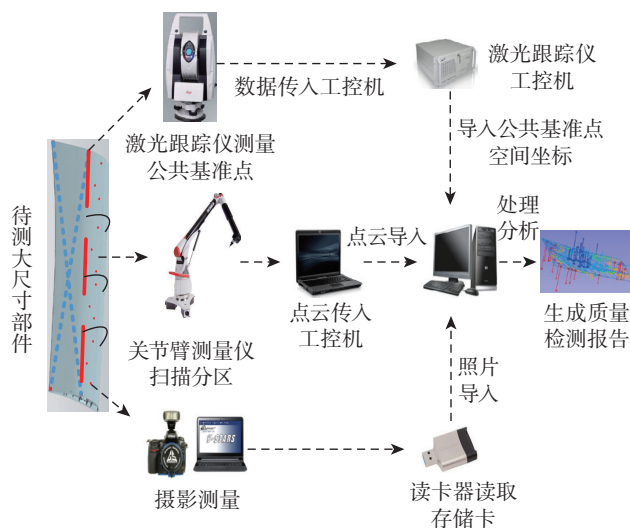


图1 飞机大部件外形组合测量系统

Fig.1 Combination measuring system of aircraft large parts shape

获取密集点云数据的区域,采用关节臂测量仪测量;对于精度要求相对较低的其他区域,使用近景工业摄影测量系统测量,在保证测量精度的情况下,减少数据整体处理时间,提升测量效率。各个区域设置公共基准点,激光跟踪仪在飞机坐标系下建站后对公共基准点进行测量。

利用计算机控制平台设置激光跟踪仪的测量方式、采集频率和测量位置,即时反馈关节臂测量仪的扫描情况。此外,激光跟踪仪与关节臂测量仪的采集数据、摄影测量照片均需要通过计算机控制平台获取,作为原始数据传入数据处理软件平台。

针对不同的测量设备,可以将数据处理软件分成摄影测量数据处理、关节臂扫描数据处理和激光跟踪仪数据处理3个模块。摄影测量数据处理模块负责将拍摄的多张局部照片进行空间三维坐标整体解算、像点拼接、杂点去除、标尺创建等操作;关节臂扫描数据处理模块主要负责将靶球的扫描点云拟合成球特征,并获取球心坐标;激光跟踪仪数据处理模块负责设备坐标系统一、测量数据模型与理论模型偏差计算以及大部件轮廓质量检测报告生成等。

在测量精度方面,组合测量不确定度依据测量不确定度合成方法<sup>[11]</sup>,不确定度为 $[389+(15+6L)^2]^{1/2}\mu\text{m}$ 与 $[(4+4l)^2+(15+6L)^2]^{1/2}\mu\text{m}$ 之中的较大值;在测量效率方面,激光集成扫描测头的测量近景宽 $w$ 为43mm,扫描频率 $f$ 为30Hz,以移动速度 $v=30\text{mm}/\text{s}$ 为例,扫描效率 $\eta_{\text{扫描}}=wv=1290\text{mm}^2/\text{s}$ 。因此,扫描 $1\text{m}^2$ 所需时间 $t_{\text{扫描}}=13\text{min}$ 。与之相比,以0.1m间隔粘贴标志点,共需100个标志点,以2min计算,扫描测量所需时间大约是摄影测量的6.5倍。因此组合测量方法相对于单一扫描测

量方法,可以显著提升测量效率。

## 2 飞机大部件外形精度组合测量系统流程构建

基于飞机大部件外形尺寸、精度要求构建飞机大部件外形数字化组合测量流程,如图2所示。测量前在预定位置布置工装ERS(Enhanced Reference System)参考点,便于激光跟踪仪在飞机坐标系下建站。依据精度要求,将大部件外形划分成两类区域,一类为精度要求高、需要大量数据的复杂型面区域,另一类为精度要求相对较低的简单表面区域。测量流程可以划分成摄影测量、关节臂扫描测量和激光跟踪仪测量3个步骤。

**步骤1: 摄影测量。**在简单表面区域粘贴人工标志点,密度参照被测表面曲率值,曲率值大的区域标志点密集、曲率值小的区域标志点稀疏,在保证测量精度的情况下尽量减少处理数据量。区域内部以及边界粘贴适量编码点,保证拍摄的每一张照片中含有3个以上编码点。在区域顶点设置4个以上靶座,以便测量靶心坐标。布置完成后,手持数码相机围绕标志点多站位、多角度拍摄,获取标志点重叠照片用于后期处理。

**步骤2: 关节臂测量仪测量。**复杂型面区域通过臂长进一步划分为若干小块,在各块区域中布置公共基准点,公共基准点必须包含3个及以上不在同一条直线上的点<sup>[12]</sup>。在公共基准点处放置靶球,关节臂测量仪扫描各分区表面以及靶球面,获得复杂型面分区及靶球轮廓的扫描点云。将点云数据存储于工控机中,通过计算控制平台转入数据处理软件。

**步骤3: 激光跟踪仪测量。**测量主要包括两个方面,

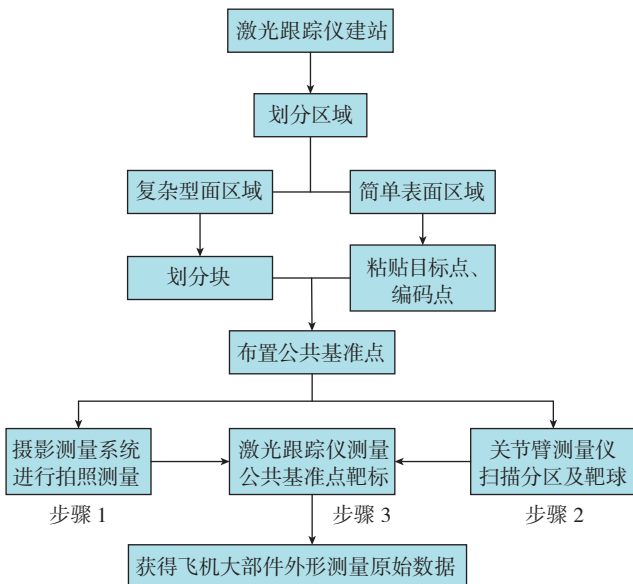


图2 飞机大部件外形组合测量流程

Fig.2 Combination measurement processes of aircraft large parts shape

一个方面是在摄影测量过程中,利用激光跟踪仪测量摄影区域边界设置的靶心坐标,以此作为摄影测量与激光跟踪仪测量的公共基准点;另一方面,利用激光跟踪仪测量关节臂扫描分区中的靶球,获取靶心坐标,并将其编号保存,作为关节臂测量仪与激光跟踪仪的公共基准点。

## 3 飞机大部件外形精度测量数据处理

在测量数据采集完成之后,需要进行多测量数据处理和飞机部件表面成形质量分析,数据处理流程如图3所示。工业近景摄影测量系统测量得到的是包含标志点的多视图照片,利用图像处理技术解算出标志点的空间位置,得到大尺寸部件外形点模型。关节臂测量仪测量获得的多块扫描点云和摄影测量获得的数据都要经过公共基准点拟合转换到飞机坐标系下,从而得到完整的飞机大部件外形测量数据模型。将测量数据模型与其理论设计模型进行比较,分析大尺寸部件外形质量。

(1) 多设备测量数据融合。

摄影测量初始获得的是包含标志点及编码点的照片,通过光束法平差计算得到像点的空间坐标。不同位置、角度拍摄的照片,经点云拼接、重点去除得到简单表面的点数据模型。此时获得的点数据模型只具有形状特征,不具有空间尺寸意义。由于飞机壁板表面尺寸比较大,常规标尺不能覆盖整个测量范围,计算对角公共基准点间距离作为基准长度,完成摄影测量的尺寸标定。以激光跟踪仪与摄影测量的公共基准点作为拟合对象,进行摄影测量数据的坐标变换。

将关节臂测量仪采集的球面轮廓扫描点云拟合成球特征,进而得到靶心坐标,靶心坐标与激光跟踪仪测量获得的公共基准点坐标最佳拟合,实现各分区区域点云自动拼接,并转换到飞机坐标系下。

将摄影测量系统与关节臂测量仪的待处理数据导入点云数据处理软件中,复杂型面扫描点云与简单表面

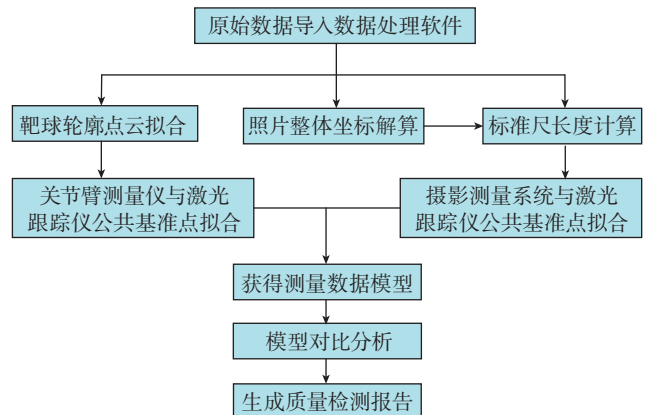


图3 飞机大部件外形测量数据处理流程

Fig.3 Aircraft large parts shape measurement data processing

的离散点移动到对应位置,拼接成完整的大部件外形数据模型。

#### (2) 大部件外形精度测量数据分析。

获得完整的飞机大尺寸部件测量数据模型之后,将点云模型与设计模型对齐,建立两模型点矢量组合。根据误差大小,设置不同颜色,以颜色带的形式显示误差大小情况。相比于传统模拟量的测量方式,本文方法不仅可以快速、准确地发现超差部位,而且可以得出具体的误差值,方便后续误差补偿。

此外,根据数据模型与理论模型的差值,可以创建大尺寸部件外形的误差分布图,直观地观察部件各区域的误差情况。同样,可以设定合格的区间,显示出不合格的区域。完成质量分析后,将分析结果以图片、表格等形式保存在分析报告中,用于查阅与修改。

## 4 实例分析

以飞机内襟翼上翼面装配外形测量为例,对其进行组合测量。内襟翼上翼面尺寸大、形状复杂,既有精度要求高的前缘复杂型面部分,又有精度要求相对较低的其他简单曲面,前缘部分公差要求为  $\pm 1.2\text{mm}$ ,其余部分为  $\pm 1.5\text{mm}$ 。实例分析过程如下:

步骤 1: 针对内襟翼上翼面形状复杂、尺寸大的特点,激光跟踪仪选用 Leica 第 5 代产品 AT401-B<sup>[13]</sup>。工业近景摄影测量系统选用美国 GSI 研发的 V-STARS/S8 系统,该系统具有高精度、高便携性及坚固耐用的特点。关节臂测量仪选用 Romer7725,单次测量范围 2.5m。靶球轮廓特征拟合误差可以控制在  $10\mu\text{m}$  以内<sup>[8]</sup>,各组成测量设备的测量不确定度互不相关,故取  $L=10\text{m}$ 、 $l=3\text{m}$  时,构建的组合测量系统测量精度为  $67.9\mu\text{m}$ 。

步骤 2: 确定好测量区域及测量方式后,在襟翼附近布设 ERS 点,确保激光跟踪仪在不同位置可以测得至少 3 个不在同一直线上的 ERS 点,确定激光跟踪仪在飞机坐标系下的位置。如果在测量中激光光线受到遮挡,可以移动激光跟踪仪。在摄影测量区域预先粘贴人工标志点,考虑到该区域曲率较小,将相邻标志点之间间距取为 0.1m。测量区域内部及测量区域边界粘贴编码点,编码点离散分布使得拍摄获得的每张照片中至少含有 3 个不在同一直线上的编码点。在 4 个边界顶点设置靶座,并安装好 V-STARS 配套工装<sup>[14]</sup>。之后,手持数码相机围绕标志点拍摄,使得任一标志点至少存在于 3 张照片中。将便携式关节臂测量仪放置于扫描分区旁边,在各个扫描分区选择不在同一直线的 3 个点布置靶座,利用便携式关节臂测量仪扫描各分区及靶球轮廓。在测量过程中,激光跟踪仪测量靶球坐标,并保存测量数据。

步骤 3: 将拍摄的照片导入摄影测量处理软件,通过图像处理完成标志点图像特征提取与标志点中心定位。对处理后的照片进行像点提取与拼接,并通过光束法平差解算出像点空间坐标,获得测量表面的点数据模型。之后,人机交互去除离群点及杂点。利用激光跟踪仪测量顶点坐标,计算出对角顶点距离,将其作为摄影测量空间标尺完成摄影测量点模型尺寸标定。通过激光跟踪仪与摄影测量的公共基准点拟合,将摄影测量获取的点数据模型转换到飞机坐标系下。将扫描获得的靶球轮廓点云拟合为球特征,得到球心坐标并与激光跟踪仪测得的靶心坐标拟合,获得的数据模型如图 4 所示。

步骤 4: 将测量数据模型与内襟翼上翼面理论模型对齐,计算数据模型与理论模型的距离,以外形轮廓偏差分布图直观呈现超差区域,如图 5 所示。通过内襟翼上翼面外形轮廓偏差矢量表,可以确定准确的超差值,如图 6 所示。

由图 5 可以看出,超差部位主要集中在边界及过渡区域(红色及深蓝色部分)。由图 6 可以定点确定矢量

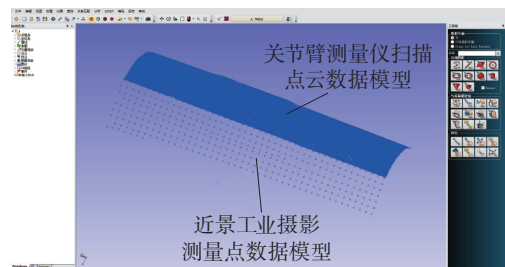


图4 内襟翼上翼面处理后测量数据模型

Fig.4 Measured data model of inboard flap upper airfoil after processing

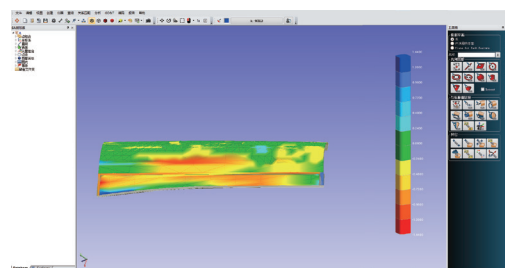


图5 内襟翼上翼面外形轮廓偏差分布图

Fig.5 Outline deviation distribution of inboard flap upper airfoil

名称	开始		结束		dX	Delta	dZ	长度Mag		
	X1	Y1	X2	Y2						
1	22694.2244	-999.4463	3329.3919	22694.2084	-998.9942	3329.3117	-0.0160	0.4821	-0.0893	0.4890
2	22695.0734	-1040.2570	3093.1871	22695.0657	-1040.1257	3093.1450	-0.0076	0.1313	-0.0221	0.1333
3	22695.4278	-1043.7850	3102.8151	22695.4308	-1043.8100	3102.6193	0.0031	-0.0250	0.0042	-0.0258
4	22679.3830	-1042.6342	3074.9633	22679.3802	-1042.5743	3074.9532	-0.0027	0.0599	-0.0101	0.0503
5	22744.5035	-1040.0169	3084.0132	22744.4909	-1041.2461	3084.2206	-0.0126	-1.2292	0.2074	-1.2468
6	22679.9550	-1044.9489	3081.0846	22679.9538	-1044.9225	3081.0801	-0.0012	0.0265	-0.0045	0.0269
7	22659.4306	-1047.3872	3053.2891	22659.4251	-1047.3010	3053.2745	-0.0056	0.0862	-0.0145	0.0876
8	22714.3206	-1044.5592	3057.4273	22714.3258	-1044.8800	3057.4983	0.0050	-0.4238	0.0710	-0.4258
9	22600.4004	-1052.2738	3058.2718	22600.4325	-1052.5167	3058.3127	0.0321	-0.2429	0.0410	-0.2454
10	22553.3521	-1054.9213	3088.7990	22553.4751	-1055.5284	3088.9013	0.1230	-0.6071	0.1023	-0.6278
11	22795.6587	-1047.0491	3085.0891	22795.6494	-1047.2218	3085.1193	-0.0073	-0.1726	0.0292	0.1753
12	22545.9454	-1057.1660	3084.6705	22546.1011	-1057.8879	3084.7922	0.1558	-0.7219	0.1217	-0.7465
13	22798.7862	-1048.3899	3060.5082	22798.7613	-1048.8780	3060.5887	-0.0249	-0.4881	0.0828	0.4958
14	22500.8624	-1027.6243	3330.8700	22500.8708	-1027.8509	3330.8744	0.0084	-0.0286	0.0044	-0.0288

图6 内襟翼上翼面外形轮廓偏差矢量表

Fig.6 Vector table of inboard flap upper airfoil outline deviation

5所在点的超差量为-0.0466mm。基于偏差分布图与偏差矢量表的结果,对超差区域定量补偿,控制内襟翼部件装配外形精度。

构建的组合测量系统通过以摄影测量精度要求相对较低的简单曲面、以关节臂测量仪扫描前缘精度要求高的复杂型面、以激光跟踪仪进行坐标变换的方式,在保证测量精度的同时减小了数据采集量,完成了对内襟翼上翼面复杂、大尺寸外形的测量,并确定出内襟翼上翼面外形超差具体位置及超差量,经验证可知本文方法比传统测量方法效果更好。

## 5 结论

本文针对飞机部件装配外形尺寸大、曲面形状复杂,型面测量数据量大,单一设备测量精度和效率之间矛盾突出的问题,研究了包含激光跟踪仪、关节臂测量仪与摄影测量设备的数字化组合测量方法。通过密集点云扫描满足高精度复杂型面的精度要求,同时对于精度要求相对较低的简单曲面采用摄影测量的方式,充分发挥各测量设备的优点,实现飞机大部件装配外形全尺寸检测。以激光跟踪仪测量距离为10m、相机拍摄距离为3m为例,组合测量方法的精度为67.9 $\mu$ m,测量相同面积摄影测量效率为扫描测量的6.5倍,因此组合测量方法在保证测量精度的同时,提高了型面测量效率。本文最后以飞机内襟翼上翼面测量为例,验证了所提方法的正确性和有效性。

## 参考文献

[1] 张健,向锦武. 柔性飞机非线性气动弹性与飞行动力学耦合静、动态特性[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1569-1582.

ZHANG Jian, XIANG Jinwu. Static and dynamic characteristics of coupled nonlinear aeroelasticity and flight dynamics of flexible aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1569-1582.

[2] 李鑫. 数字化测量技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(13): 52-55.

LI Xin. The application of digital technology in the aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 52-55.

[3] 韩清华,郑保,郭宏利,等. 采用激光跟踪仪测量飞机外形[J]. 航空计测技术, 2004, 24(1): 15-16.

HAN Qinghua, ZHENG Bao, GUO Hongli, et al. Measurement of aircraft outline by using laser tracker equipment[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2004, 24(1): 15-16.

[4] 孙中升. 关节臂测量机在大尺寸测量中的应用[J]. 江苏现代计量, 2008(5): 72-74.

SUN Zhongsheng. Application of articulated arm measuring machine in large size measurement[J]. Jiangsu Present Day Metrology, 2008(5): 72-74.

[5] 王巍,谷天慧,俞鸿均,等. 基于关节臂测量机的发动机叶

片型面测量技术研究[J]. 机械工程师, 2016(4): 36-38.

WANG Wei, GU Tianhui, YU Hongjun, et al. Research of turbine blade profile measuring technique based on joint arm measurement machine[J]. Mechanical Engineer, 2016(4): 36-38.

[6] 陈彦,李晓宁,王声,等. 照相测量技术在飞机大部件检测中的研究与应用[J]. 新技术新工艺, 2016(10): 63-67.

CHEN Yan, LI Xiaoning, WANG Sheng, et al. Research and application of photographic measurement technology in the detection of large parts of aircraft[J]. New Technology & New Process, 2016(10): 63-67.

[7] 王梅,牛润军. 数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究[J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 109-112.

WANG Mei, NIU Runjun. Application of digital measurement in aircraft shape check[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 109-112.

[8] 景喜双,张鹏飞,王志佳,等. 数字化组合测量辅助飞机装配质量检测技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1196-1201.

JING Xishuang, ZHANG Pengfei, WANG Zhijia, et al. Aircraft assembly quality inspection technology based on digital combination measurement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1196-1201.

[9] 房鹤飞,高瑞翔,徐强胜. 一种提高激光跟踪仪转站准确度的方法[J]. 上海计量测试, 2017, 258(2): 15-17.

FANG Hefei, GAO Ruixiang, XU Qiangsheng. A method for improving coordinate transformation precision of laser tracker[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2017, 258(2): 15-17.

[10] 黄鹏,王青,李江雄,等. 激光跟踪仪三维坐标转换综合优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2912-2920.

HUANG Peng, WANG Qing, LI Jiangxiong, et al. Comprehensive optimization for three-dimensional coordinate transformation of laser tracker[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2912-2920.

[11] 常宗英. 测量不确定度的合成方式[J]. 计量技术, 2012(1): 67-69,75.

CHANG Zongying. A synthetic method of measuring uncertainty[J]. Measurement Technique, 2012(1): 67-69,75.

[12] LIU W L, WANG Z K. New method for large-scale dimensional metrology using laser tracker system[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 4247-4250.

[13] 黄宇. 激光跟踪仪在飞机数字化制造过程中的应用[J]. 航空制造技术, 2011, 54(6): 32-37.

HUANG Yu. Laser tracker application during digital manufacturing of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(6): 32-37.

[14] 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, 56(7): 42-45.

LEI Bao, HE Wei, WANG Yonghong. 3D digital photogrammetry for aircraft part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(7): 42-45.

通讯作者: 田锡天,博士、教授,研究方向为CAPP、信息化、数控加工和超声振动切削等, E-mail: tianxt@nwpu.edu.cn.

(责编 铃兰)