

数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究

Application of Digital Measurement in Aircraft Shape Check

中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司 王梅 牛润军

[摘要] 通过对工业近景摄影测量与激光跟踪仪测量基本原理的分析,结合某机型后机身对接区域外形检测的实例,介绍了近景摄影测量与激光跟踪仪在飞机外形测量领域的测量流程与注意事项,主要包括测量需求分析、设备选型、粘贴反光标志、布设公共点与基准长度、拍照测量等。

关键词: 数字化测量 飞机外形 应用研究

[ABSTRACT] First, the basic principle about the industrial photogrammetry and laser tracker measuring is analyzed. Combined with the examples of the fuselage shape detection on the butt area of a rear fuselage, the measurement procedures and precautions of the industrial photogrammetry and laser tracker measurement in the field of aircraft shape measurement is described. It includes the measurement requirement analysis, equipment selection, paste reflective signs, laid common point with the reference length, camera measurement.

Keywords: Digital measurement Aircraft shape Application research

现代飞机等大型复杂产品制造能力是衡量国家工业基础、科技领先水平、综合国力以及国防现代化程度的重要标志,能够体现国家综合实力、军事威慑能力和国际影响力。飞机装配作为飞机制造的主要环节,其劳动量占整个飞机制造劳动量的 50% 以上,飞机装配技术是一项技术难度大、涉及学科领域多的综合性集成技术^[1]。整个过程涉及了成千上万的零部件、工装、夹具、工具、装配操作等,具有整体结构复杂、工艺难度大、装配误差控制难度高等特点,是整个飞机制造过程的龙头、关键和核心技术。通过数字化检测装备与技术,准确检测其各个装配组件外形准确度、空间位姿,快速获得检测结果的分析评估,保证产品装配精准快速,是提高飞机产品装配效率和质量的关键。数字化检测是现代飞机数字化装配的基础工作,是连接飞机设计与制造的桥梁,是保证飞机产品质量的重要技术。

目前国内飞机制造行业,数字化检测技术仍然处于零星的研究和应用状态,存在使用效率低、检测数据可

读性和共享性差、无法对装配结果进行合理评估等问题,没有对装配精度提升贡献出原有价值^[2]。而随着飞机制造技术迅猛发展,数字化检测技术已成为控制、检验和保证飞机装配精确度与整体结构可靠性的关键和核心。

本文将针对某型飞机后机身装配外形准确度难以准确检测的问题,基于激光跟踪仪测量系统、工业近景摄影测量系统等先进数字化测量设备,对后机身对接区域的外形轮廓进行测量,并以三维数模为基准对比分析后机身产品的轮廓准确度及偏差分布,打通从设计、制造到装配的数字化、一体化流程,形成设计-制造-检测数字量传递的闭环控制,探索数字化测量技术在我国飞机制造业中的应用模式。

1 工业近景摄影测量系统

工业近景摄影测量系统是建立在摄影测量数字成像图像处理和精密测量原理基础上的新型精密测量技术,采用类似于经纬仪系统的空间交汇三角测量模型^[3],基于高性能数字成像器件作为传感元件,在不同空间位置对被测物体拍摄 2 张以上的照片,结合图像处理及模式识别技术实现对目标物体被测点的自动识别瞄准和角度测量,计算出被测物体测量点的三维空间坐标,获得被测物曲面结构、外形尺寸、相对位置等信息。

与其他的数字化测量设备比较,工业近景摄影测量系统具有精度高,便携性,现场工作量小,不易受温度变化、振动等外界因素的干扰及在狭窄空间易于测量等优点^[4],在飞机大尺寸部件对接装配测量中具有突出的优势和广阔的应用前景。

三维数字摄影测量的基本原理是通过一台(或者多台)高分辨率的数字相机对被测物摄影,采用回光反射标志得到物体的准二值数字影像,经计算机图像处理后可以得到反射标志点精确的 X 、 Y 、 Z 坐标。它是通过不同位置的相机对多个目标同时测量,从而可以计算出相机间的位置和姿态关系,以及目标点的三维坐标。设测量点 P_i 处有 j 个摄站(j 条光线)相交,如图 1 所示,则共有 j 个共线方程,如公式(1),详细计算公式可参考文献

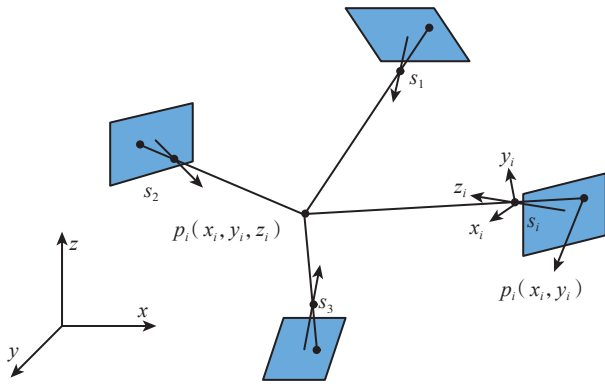


图1 摄影测量原理

Fig.1 Photography measurement principle

献 [5]。根据最小二乘原理,将多个光线(束)的共线方程联立求解(光线束法平差)可以求得目标点的空间坐标 (X, Y, Z) 。

$$\begin{cases} y_{ij} - y_{0j} + \Delta x_{ij} = f_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{Sj}) + b_{1j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{1j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \\ y_{ij} - y_{0j} + \Delta y_{ij} = f_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{Sj}) + b_{2j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{2j}(Z_i - Z_{Sj})}{a_{3j}(X_i - X_{Sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{Sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{Sj})} \end{cases} \quad (1)$$

2 激光跟踪仪测量系统

激光跟踪仪测量系统,指的是一套以激光为测距手段,由激光跟踪头、反射标靶、控制器、测量附件和用户计算机等功能部件组成的测量系统,它同时配有绕两个轴转动的测角机构,形成一个完整球坐标测量体系,可以用来测量静止目标,或者跟踪、测量移动的目标 [6]。

跟踪头的激光束、旋转镜和旋转轴构成了激光跟踪仪的 3 个轴,3 轴相交的中心是测量坐标系的原点。激光跟踪仪可以连续地瞄准、跟踪并确定由移动或稳定的反射目标返回激光束的位置。简单地说,激光跟踪测量系统可静态或动态地跟踪一个在空中运动的点,由此形

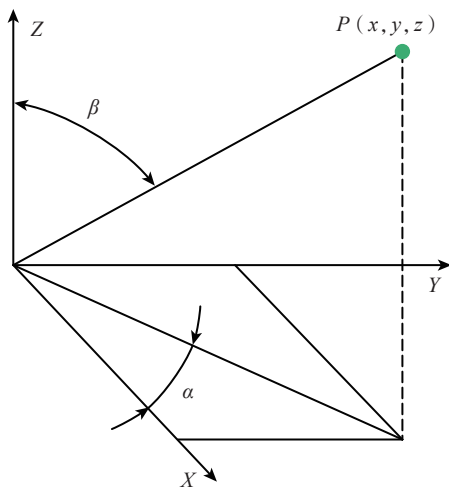


图2 激光跟踪仪测量原理

Fig.2 Laser tracker measurement principle

成球坐标测量系统,测得 3 个球坐标系中的位置参量。其中,两个角编码器根据旋转部件转动的角度自动计算靶标相对于跟踪仪的水平方位角 α 和垂直方位角 β ,如图 2 所示;靶标与激光跟踪仪之间的距离 OP 由激光干涉仪测量,干涉信号经整形、放大后输入可逆计数器计算出总脉冲数,再由电子计算机按计算公式计算出位移量 OP 。最后,通过公式(2)即可确定目标在直角坐标系的位置矢量 $P = (x, y, z)$,

$$\begin{cases} x = OP \sin \beta \cos \alpha \\ y = OP \sin \beta \sin \alpha \\ z = OP \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

3 测量流程

针对飞机产品外形准确度的测量检测是一项复杂而细致的工作,飞机产品的结构复杂、外形多样、精度要求高、现场环境复杂多变,给测量检测工作带来极大的挑战。因此,需要针对不同的被测飞机产品与测量环境制定不同的测量流程,其中主要包括测量需求分析、测量设备选型、人工标志的布设规划、照相区域的划分等方面,旨在快速、准确地获取飞机产品外形轮廓准确度、尺寸公差控制情况、实时空间位姿等信息,判断和预防制造或装配的问题,控制最终飞机产品的装配质量。

3.1 测量需求分析与设备选型

本文的测量对象为某机型后机身对接区域,采用激光跟踪仪与摄影测量等先进数字化测量技术相结合的方法,获得飞机设计坐标系下后机身对接区域蒙皮表面的三维外形点云模型,并基于设计数模进行对比分析,输出产品实测外形偏差数值与详细分布情况,由此分析现有装配工艺流程下飞机产品的装配质量。

所采用的摄影测量设备为美国 GSI 公司研制的三维数字摄影测量系统 V-STARS/M,该测量系统可采用单相机脱机测量和双相机联机测量两种测量方法,如图 3 所示 [7]。

单相机系统测量时,只需要测量人员手持相机离开被测物体一定距离,从多个位置和角度拍摄一定数量的数字相片(图 3 (a)),然后通过无线或存储卡将相片导入计算机内,由 VSTARS 软件自动处理(标志点图像中心自动定位、自动匹配、自动拼接和自动平差计算)得到特征标志点的 X, Y, Z 坐标。该系统测量时对工作环境要求低、便携且移动灵活,配合粘贴人工反光标志,可实现难测量区域、复杂环境下飞机部件外形轮廓信息的快速获取。

双相机系统测量时,需要采用配套联机附件将 2 台相机与计算机相连,通过 VSTARS 软件控制相机拍摄数字相片,见图 3 (b),可以同时测量被测物体上的特征

标志点集,也可以通过辅助测量棒实现单点测量,尤其适合隐藏点测量。通过 PRO-SPORT 投点器或者人工

布设反光标志,可实现密集点云数据快速采集,测量人员可以自定义点云密度,最大可达 3×10^4 点 / m^2 。

本文中所测量的为后机身处于装配型架时的外形轮廓,从测量现场环境(如被测量部件周边区域是否平整稳定,遮挡物、障碍物分布情况,现场电源供应等)、被测量部件可视角度、点云密度的需求、需要获取的外形信息等方面考虑,单相机系统更为合适。

3.2 粘贴反光标志

在拍摄照片前,需要通过反光标志、概略自动定向棒、基准尺等人工标志将被测部件目标化。V-STARS 系统只能识别布设的反光标志,无法直接对被测物进行测量,只有通过直接或间接的布设人工标志将被测物目标化,方可进行测量。

反光标志的分类很多,它的质地、形状和大小与测量方法、测量对象的要求和环境有关,如图 4 所示。它在照相测量中的作用是作为控制点(已知点)或者是待测未知点。

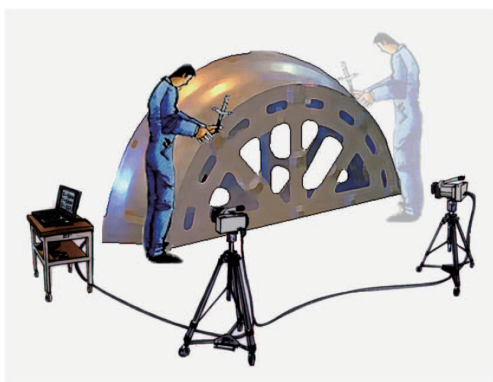
针对后机身对接区域的测量,在蒙皮环向端面向内 30cm 宽度区域内,均匀粘贴 3~4 圈单条长度为 0.5m 的反光条,如图 5 所示,以反光点的空间坐标反映后机身蒙皮表面的实际轮廓信息。此外,还需在测量区域内均匀粘贴一定数量的编码标志点,用于实现不同相片间的拼接和计算自动化。

3.3 布设公共点与基准长度

在没有给定基准尺的情况下,照相测量获得点云模型是无尺寸信息的,只是一个等比缩放体,因此需要加



(a) 单相机测量



(b) 双相机测量

图3 V-STARS系统的两种测量方法

Fig.3 Two kinds of V-STARS measuring methods

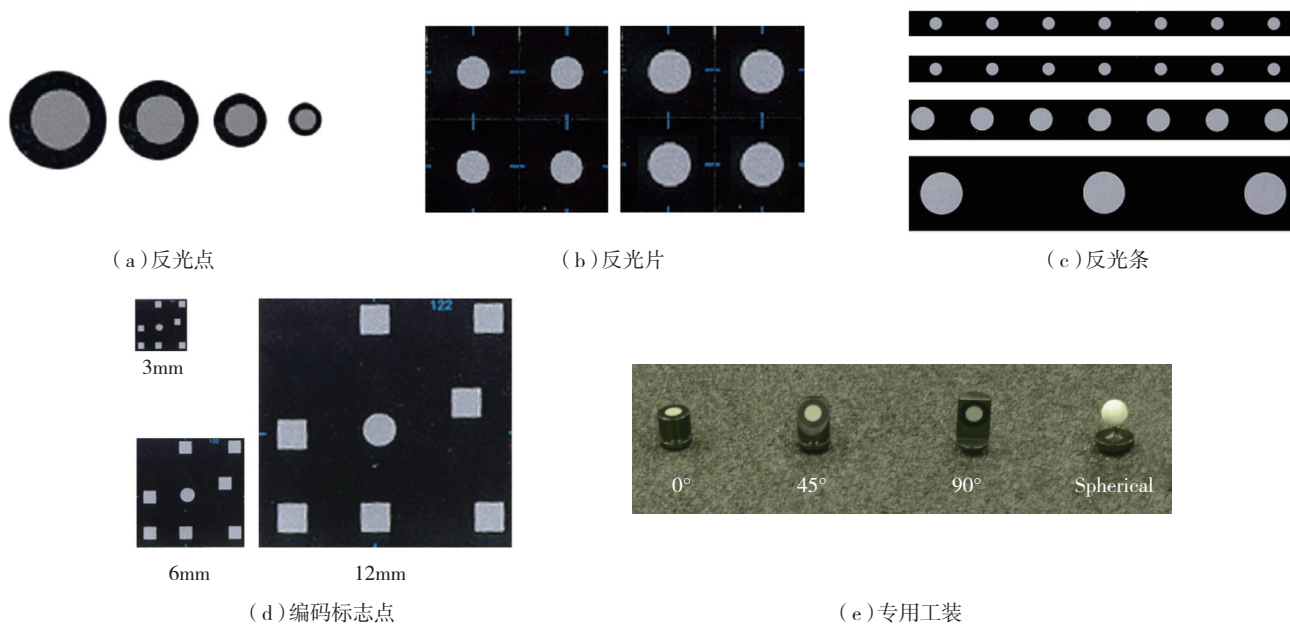


图4 V-STARS系统反光标识

Fig.4 Reflecting marking of V-STARS

入一个尺度去还原物体的真实尺寸。如果能确定点云中某两点间的真实距离,那么就可以计算完整点云模型的尺寸信息,因此我们加入了基准尺的概念。

后机身测量区域的最大尺寸远大于摄影测量系统自带的钢钢基准尺,所以需要配合激光跟踪仪获得基准长度。如图5所示,在后机身上部保型框表面和下部支撑工装型架上共固定4个激光跟踪仪靶座(图5中红色三角),形成两条基准长度(图5中红色虚线)以保证测量精度,且两条基准长度应尽量接近后机身框体的最大直径。

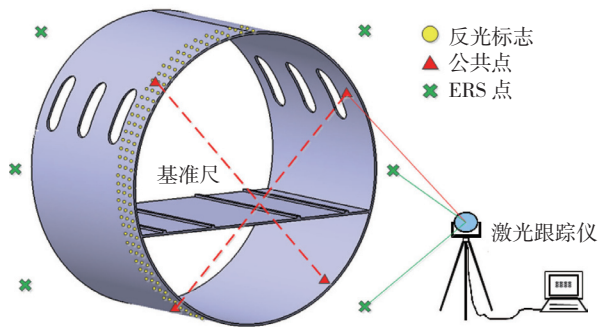


图5 人工标志布设示意图
Fig.5 Artificial mark arrangement

此外,摄影测量过程中建立的工作坐标系与飞机设计坐标系并不重合,需要通过公共点进行坐标系转换。借助激光跟踪仪和工装 ERS 系统,通过测量 9 个 ERS 点,完成激光跟踪仪在飞机设计坐标系下的建站,随后通过激光跟踪仪测量之前布设的 4 个靶座所对应靶标点的空间坐标,该坐标即为飞机设计坐标系下的三维坐标,同时获得靶标点之间的距离尺寸,完成公共点与基准长度的布设工作。

在拍摄过程中,使用 V-STARS 系统配套的特殊工艺装备,对激光跟踪仪靶标点同时进行采集,软件实现点云的拼接对合后,将空间坐标及基准长度的尺寸信息输入点云中的靶标点,即可完成测量点云数据的坐标系转换与尺寸标定。

3.4 拍照测量

考虑相机镜头视场角、摄影距离、测量精度、测量场地、后机身尺寸等问题,采用局部摄影、整体解算的方法,整体解算以编码标志作为图像之间的公共连接点。后机身对接区域整体外形规则,无明显摄影死角或难测量区域,因此测量方案是环向围绕飞机后机身进行均匀拍摄测量,然后针对坐标系转换公共点的区域,配合摄影测量专用工装,进行重复拍摄,实现对后机身对接区域的全面摄影。

使用单相机拍摄时,应遵循以下拍摄要求:

- (1) 每拍摄完一张照片后,需要转动相机 90° 再进行下一次拍摄;
- (2) 对于大尺寸需要分块拍摄的被测物,每处相机拍摄区域至少需 4~6 张相片;
- (3) 每处相机分块区域至少需要从 3 个不同方位和角度进行拍摄;
- (4) 每张图片需看见概略自动定向棒或至少 4 个编码标志点,且点不能在同一直线上;
- (5) 每幅图片至少要看到 12 个测量点;
- (6) 相邻分块拍摄部分至少需 3 个公共标志,且公共标志不能共线,应按三角形或其他规则图形分布。

完成全部拍摄工作后,将照片数据导入 V-STARS 软件中,完成后机身对接区域外形点云数据的解算、基准长度的赋予、工作坐标系的转换等工作,最终获得飞机部件外形三维点云。并可以此点云为基础,匹配飞机设计数模,实现后机身对接区域外形准确度精准检测、公差控制分析、装配质量评估等目的。

4 总结

本文结合具体的工作研究经历,介绍了基于激光跟踪仪测量系统、工业近景摄影测量系统等先进数字化测量设备进行飞机部件外形测量的流程和方法。

在飞机部件装配领域应用数字化测量技术,旨在快速、准确地获取飞机产品外形轮廓准确度、尺寸公差控制情况、实时空间位姿等信息,判断和预防制造或装配的问题,控制最终飞机产品装配的质量,实现传统的装配后定性检验向先进的数字化装配过程中定量检测监控转变,大幅提升现代飞机装配的质量和效率,而且更能适应现代飞机数字化设计,为飞机整体结构的可靠性与安全性提供保障,全面提升飞机的制造精度与研制水平,突破传统飞机生产模式。

参考文献

- [1] 王云渤. 飞机装配工艺学. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] 李泷泉, 黄翔, 方伟, 等. 飞机装配中的数字化测量系统. 航空制造技术, 2010(23):46-48, 59.
- [3] 郝继贵, 叶声华. 工业现场近景数字摄影视觉精密测量. 地理空间信息, 2004, 2(6):11-14.
- [4] 黄桂平, 钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统. 宇航计测技术, 2007, 27(4):15-19.
- [5] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [6] 王彦喜, 闵俊, 刘刚. 激光跟踪仪在飞机型架装配中的应用. 航空制造技术, 2010(19):92-97.
- [7] 黄桂平, 钦桂勤, 卢成静. 数字近景摄影大尺寸三坐标测量系统 V-STARS 的测试与应用. 宇航计测技术, 2009, 29(2):5-9.

(责编 亦非)