

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.01.006

大尺寸复合材料薄壁异形回转体零件数字化测量技术研究

郑炜¹,陈明¹,杨亚鹏¹,张沅²,王宏博¹

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司,陕西 西安 710089;

2. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘要:针对薄壁大尺寸回转体类复合材料零件曲面复杂度高、测量可达性差的问题,研究其非接触数字化测量技术。基于摄影测量建立高精度全局测量场,实现高精度内外形面整体测量误差控制;根据内外形面的特点,设计多传感器组合测量方法,能够在保证扫描精度的同时提高扫描效率。针对内部复杂形面测量,设计一种专用的测量数据采集机构,以解决无法人工携带扫描设备进入型腔内部的难题;并在测量完成后基于几何定位特征进行多源数据融合,进行多段测量数据拼接,最终实现了回转体内外形面高精度整体测量。

关键词:大尺寸回转体;复合材料;测量场;激光扫描

中图分类号:TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0026-04

Digital Measurement Technology for Large Size Thin-walled Composite Parts with Rotational Symmetry

ZHENG Wei¹, CHEN Ming¹, YANG Yapeng¹, ZHANG Yuan², WANG Hongbo¹

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

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The non-contact digital measurement technology accurately measuring the morphology of large-size thin-walled composite parts with rotational symmetry is studied. A high-precision global measuring field is established by the photogrammetry technology to control the overall measurement error of the inside and outside morphologies. Based on the features of internal and external surfaces, the measuring method of multi-sensor combinations is designed to realize scanning accuracy as well as scanning efficiency. A special data acquisition equipment is designed for the measurement of the internal complex surfaces to overcome the difficulty of manual operation in a closed structure. The data from multiple sources are integrated together by the multi-source data fusion base on geometric positioning features and multi-segment measurement data are spliced to achieve the overall high-precision measurement for both internal and external surfaces.

Keywords: large size rotational symmetry; composite; measuring field; laser scanning

0 引言

随着基于实测数据的数字化预装分析技术的发展,以传统量具为代表的接触式测量方法已无法满足指导数字化装配过程的需求。近年来,国内飞机制造厂引进了大量用于外形测量的数字化设备,数字化测量技术在零部件外形测量领域的研究不断深化,出现了许多数字化检测方法,如机械探针接触法^[1-2]、光学干涉原理检测法^[3]、机器视觉技术^[4-5]、工业CT扫描^[6]以及核磁共振^[7]等。其中接触法测量单点定位准确但测量效率较低,激光测量装置质量轻,体积小,不受电磁干扰,无放电和高压现象^[8-9]。基于以上优点,激光测量的应用范围越来越广,逐渐成为

数字化检测技术的重要手段。激光测量不仅能够发挥光学测量的优点,实现高精度的检测,同时还具有使用简单、快捷有效的特点,对于提高飞机制造效率和质量具有重大意义。

随着复合材料在飞机制造过程中的大量应用,薄壁大尺寸回转体类零件越来越多。由于回转体类复合材料零件尺寸大、壁厚小,各截面形状分布不规则,难以一次性完成测量。另一方面,回转体零件内形面为封闭型腔,其区域空间不允许携带扫描设备进入,进一步增大了测量的难度。因此,本文提出一种高效、准确的测量方法,能够准确地评价薄壁大尺寸回转体复合材料零件制造准确度,从而满足数字化装配需求。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB17075001)

第一作者简介:郑炜(1987—),男,湖北黄冈人,高级工程师,硕士,研究方向为飞机数字化装配和测量技术。参与各类重点科研项目10余项,获国防科技进步三等奖及航空工业科技进步二等奖,软件著作权1项,授权/受理专利9项,重要期刊发表论文10余篇。

1 概述

1.1 测量对象

本文的研究对象为薄壁大尺寸回转体类复合材料零件如图1所示。该零件具有空间尺度大(长度超过5 m)、形面结构复杂等特点,而激光测量仪具有一定的测量范围和适用对象,单一测量设备无法对所述测量对象实现一次性整体测量。因此本文提出一种组合式测量方法,即针对内外形面采用不同的设备分别进行测量。

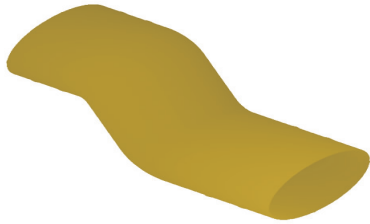


图1 测量对象

1.2 测量设备

针对大型自由曲面的尺寸大、结构复杂等特点,国内外已有相关研究,并涌现了一批基于三维形貌测量技术的测量设备,如激光跟踪仪、IGPS、三坐标测量机、投影摄像测量系统、全站仪、关节式测量臂等。其中三坐标测量机、关节式测量臂采用接触式逐点测量的方式,测量效率较低且需要经常校准测头;激光跟踪仪和IGPS等因光路原因无法实现形面完整扫描;数字摄影测量技术需要在测件表面添加标记点,可用于构建高精度测量场,跟踪式三维扫描设备能高效率实现形面扫描。本文的测量设备如图2所示,主要包括:

- 1) 动态跟踪测量装置 C-Track(图2(a));
- 2) 3D 扫描仪 MetraSCAN 750,设备参数:最高精度为0.030 mm;分辨率为0.050 mm;测量速率为480 000次/s(图2(b));
- 3) 3D 扫描仪 HandySCAN 700,设备参数为最高精度为0.030 mm(图2(c));
- 4) MaxSHOT 3D 摄影测量系统(图2(d));
- 5) 测量标记点、靶球、编码片若干。

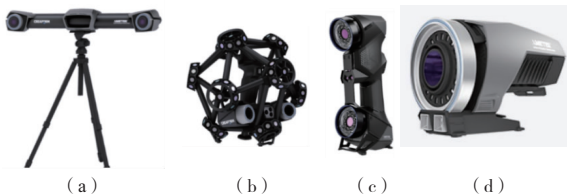


图2 测量设备

1.3 测量方案

本文研究一种基于三维扫描仪和摄影测量相结合的测量手段。通过基于摄影测量建立高精度测量控制场生

成全局坐标系,根据零件形面特点采用不同的三维激光扫描仪完成数据采集测量,最后基于几何定位特征将多站位测量数据配准融合,实现零件高精度整体测量。

2 测量实施

2.1 零件姿态固持

薄壁大尺寸复合材料零件的弱刚性容易在重力的作用下产生变形,会极大地影响测量的精度进而导致后续虚拟预装配精度低。针对此类零件,采用与装配型架集成的带飞机坐标系 ERS 点的专用检测托架,利用外形卡板保证零件姿态与飞机姿态一致。

2.2 高精度测量场构建

由于多站位测量数据为增量式采集,缺少整体的精度把控,随着扫描站位的增加,将会产生一定累积误差,从而影响最终测量结果。针对这一问题,本文采用基于摄影测量的高精度测量场构建技术,核心在于建立覆盖整个测量区域的控制场。如图3所示,其原理为通过多台高分辨率的数字相机对被测物摄影,采用回光反射标记点得到物体的数字影像,假设 j 个摄站(j 条光线)相交,则会有 j 个共线方程。根据最小二乘原理,将多条光线(束)的共线方程联立求解(光线束法平差)即得到标记点的空间坐标。通过解算测量区域内标记点的坐标作为大尺寸零件点云数据的误差约束来提高整体测量精度,消除大尺度增量测量误差累积问题,实现整体曲面的高精度测量。

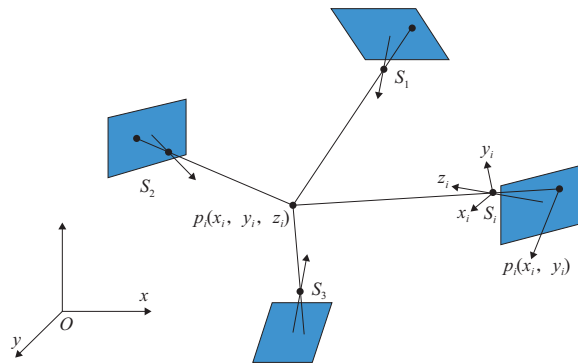


图3 摄影测量原理

基于摄影测量的高精度测量控制场建立是一个复杂而细致的过程,本文中依据设备附带软件 Vxelements 和 MaxSHOT 进行测量控制场构建,生成全局坐标系,通过专用托架上的 ERS 点拟合对齐到飞机坐标系。摄影测量整体过程可以概括为测量准备、布设标志、拍摄影像、数据处理等4个步骤,流程如图4所示。

对于标记点布置,包括编码标记点和非编码标记点。非编码标记点使用高反射标记点分为6 mm 和 12 mm 两种规格,其中6 mm 目标点布置在零件内形面,约200 mm 添加一个标记点,供 HandySCAN 700 使用;12 mm 标记点布置在零件外形面,约300 mm 添加一个标记点,供 C-track 转站定位使用;在 ERS 点处使用测量靶标;编码标记点按间距600~1 000 mm 分布,确保 SHOT 在拍照过程中每张

图片含有至少4个编码标记点,且编码标记点在不同图片之间形成重叠。

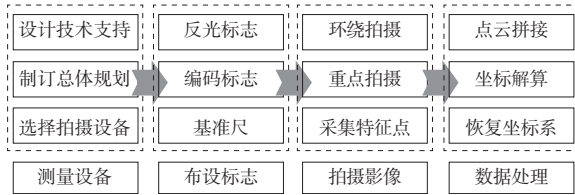


图4 测量控制场建立流程

2.3 外形面测量

针对零件外形面特点,使用基于三维激光扫描技术的 MetraSCAN 3D 无臂手持式扫描仪与双目跟踪系统 C-Track 双摄像头传感器相结合的多站位测量方式。具体为:MetraSCAN 3D 光学 CMM 扫描系统具有较高的稳定性和精度,可以动态扩展测量范围而不降低精度,用于外形面扫描数据采集。C-Track 双摄像头传感器配有高品质光学设备和特殊的照明装置,能够在其操作空间内测量所有的反射体,可以连续采集和传输图像、反射器照明、与计算机交换命令、存储传感器参数等,用于跟踪扫描仪。各站位扫描数据通过 ERS 点和测量场统一到飞机坐标系下。

2.4 内形面测量

内形面整体成筒形,无法从外部实现完整的内形面数据采集,人工携带扫描设备进入内部会造成零件变形,因此本文设计一种集成 HandySCAN 扫描仪的可伸缩测量装置辅助测量。其中,在两端开口处可直接进行扫描,对于离开口较远的深处,根据形面位置调节脚架高度,控制支撑平台横向平移并调整扫描仪与伸缩杆轴线夹角,由伸缩杆控制扫描仪,沿伸缩杆的轴线进行旋转扫描,经过多次循环,完成内形面数据采集。辅助测量装置如图5所示,内形面扫描示意图见图6。

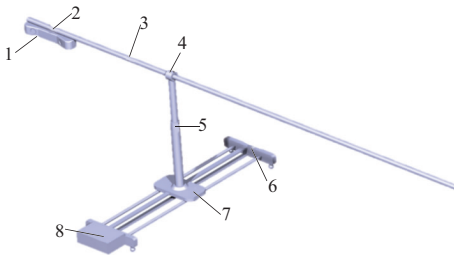


图5 内形面测量装置

图5中:

1 为 HandySCAN 扫描仪,和伸缩杆通过电控角度调节模块连接,可调整扫描平面与伸缩杆轴线夹角。

2 为电控角度调节模块,利用蜗轮蜗杆传动机构实现扫描仪与伸缩杆轴线夹角的电动控制。

3 为伸缩杆,碳纤维伸缩杆,伸出总长超过3m。

4 为接头,使用滚动轴承连接脚架与伸缩杆,并且保留沿伸缩杆轴线转动自由度,使得伸缩杆可以带动其上固

连的扫描仪沿伸缩杆轴线转动进行一定范围的扫掠。与脚架连接部分为球铰接头,提供伸缩杆与扫描仪以球铰为中心的3个转动自由度。

5 为脚架,为伸缩杆和扫描仪提供主要支撑。中轴可伸缩,高度可调。

6、7、8 为支撑平台,用以承载脚架。

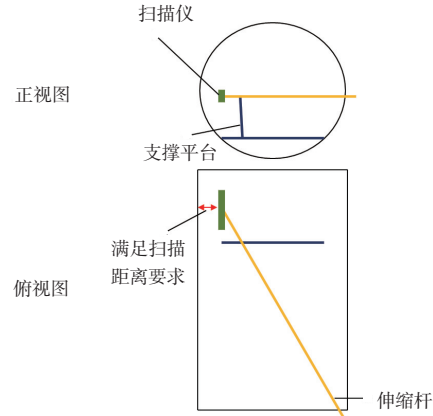


图6 测量装置扫描示意

3 数据融合分析

内、外形面在分段扫描时,所基于的坐标系可能不同,导致扫描得到的数据不在同一坐标系,为保证最后所有的扫描数据都在同一坐标系,并且对齐到飞机坐标系,需要对相关几何定位特征进行提取,然后基于分段数据之间的共同定位特征进行数据融合。本文选取孔作为定位特征,以定位孔特征为例,需要根据扫描数据进行孔心提取,实际圆孔周围扫描数据经常会出现数据残缺、有噪声等问题。因此,本文中采用基于最小二乘的几何孔心拟合算法用于计算孔中心坐标,具体如下:

圆孔中心坐标参数为

$$x = z_1 + r \cos \varphi \quad (1)$$

$$y = z_2 + r \sin \varphi \quad (2)$$

设点 $P_i = (x_{i1}, x_{i2})$, 点到圆心的距离 d_i 为

$$d_i^2 = \min_{\varphi_i} [(x_{i1} - x(\varphi_i))^2 + (y_{i1} - y(\varphi_i))^2] \quad (3)$$

通过最小化所有点的 d_i 的平方和可得到 z_1 、 z_2 和 r 的值:

$$\sum_{i=1}^m d_i^2 = \min \quad (4)$$

最小化 z_1 、 z_2 、 r 和 $\{\varphi_i\}_{i=1 \dots m}$, 得到式(5)的最小值:

$$Q(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m, z_1, z_2, r) =$$

$$\sum_{i=1}^m [(x_{i1} - x(\varphi_i))^2 + (y_{i1} - y(\varphi_i))^2] \quad (5)$$

相当于求解非线性最小二乘问题:

$$z_1 + r \cos \varphi - x_{i1} \approx 0 \quad (6)$$

$$z_2 + r \sin \varphi - x_{i2} \approx 0 \quad (7)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, m$ 。

令 $u = (\varphi_1, \dots, \varphi_m, z_1, z_2, r)$, 则与 Q 相关的雅可比 (Jacobian) 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} rS & A \\ -rC & B \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $S = \text{diag}(\sin \varphi_i)$, $C = \text{diag}(\cos \varphi_i)$, S 和 C 均为 $m \times m$ 的对角矩阵; A 和 B 是 $m \times 3$ 的矩阵, A 和 B 定义为

$$a_{i1} = -1, a_{i2} = 0, a_{i3} = -\cos \varphi_i \quad (9)$$

$$b_{i1} = -1, b_{i2} = 0, b_{i3} = -\sin \varphi_i \quad (10)$$

当 m 较大时, 矩阵 J 将非常稀疏, 且矩阵 J 的左半部分 $\begin{bmatrix} rS \\ -rC \end{bmatrix}$ 是正交的, 可以用正交矩阵来计算矩阵 J 的 QR 分解, 其中 Q 矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} S & C \\ -C & S \end{bmatrix} \quad (11)$$

用 Q 的转置左乘矩阵 J 得到

$$Q^T J = \begin{bmatrix} rI & SA - CB \\ O & CA + SB \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过计算一个 $m \times 3$ 的子矩阵, 即可得到雅可比矩阵的 QR 分解

$$CA + SB = UP \quad (13)$$

然后

$$\begin{bmatrix} I & O \\ O & U^T \end{bmatrix} Q^T J = \begin{bmatrix} rI & SA - CB \\ O & P \end{bmatrix} \quad (14)$$

通过回代得到最终解。

在分段扫描前先导入测量场控制点, 其中 12 mm 目标点 (供 C-Track 识别配准)、6 mm 目标点 (供 HandySCAN 700 识别配准)、编码目标点 (辅助 C-Track 识别配准), 导入测量场控制点后, 所有的扫描数据将自动配准到测量场从而达到多源数据融合的目的。

4 结语

本文建立了一套薄壁大尺寸回转体类复合材料零件精准数字化测量方法, 首先通过摄影测量建立了高精度全

局测量场, 实现高精度内外形面整体测量和误差控制。针对内外形面各自特点选用不同扫描设备完成了数据采集, 通过几何定位特征将多段扫描数据融合, 利用 ERS 点拟合对齐到飞机坐标系, 实现了薄壁大尺寸回转体类复合材料零件精准数字化整体测量。

参考文献:

- [1] 王琛. X 射线激光及其应用研究—探针法测量等离子体电子密度实验研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 2000.
- [2] 司凯文. 三坐标测量机的工作原理及其维护与保养[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 129-131.
- [3] 刘经佑, 雷枫. 透过式低相干光学干涉方法测量透镜中心厚度[J/OL]. 激光与光电子学进展 (2019-06-26) [2022-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20190125.1300.036.html>.
- [4] 王延哲, 陈志强, 王雅婷. 基于机器视觉技术的轮轨横向位移测量方法[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 135-138.
- [5] LYU Q, CAI J R, LIU B, et al. Identification of fruit and branch in natural scenes for citrus harvesting robot using machine vision and support vector machine [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(2): 115-121.
- [6] 戚玉涵, 葛浙东, 张星梅, 等. 工业 CT 扫描在原木内部缺陷检测中应用[J]. 木材工业, 2018, 32(6): 38-40.
- [7] 张磊, 石军太, 张庆辉, 等. 鄂尔多斯盆地东南部页岩岩磁共振实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2876-2885.
- [8] 刘俊亨, 孙双花, 田明, 等. 基于激光干涉仪的位移传感器标定技术研究[J]. 计量学报, 2017, 38(增刊1): 85-88.
- [9] BAI R, OSTACHOWICZ W, RADZIERISKI M, et al. Vibrational damage detection using fractal surface singularities with noncontact laser measurement[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(11): 2569-2581.

收稿日期: 2022-12-25

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 曲云飞, 吴化敏, 秦美超. HXN_{3B} 型交流传动调车机车一系悬挂装置设计[J]. 轨道交通装备与技术, 2016(3): 16-17, 23.
- [2] 宋晓文, 马卫华, 罗世辉. 缓和曲线长度对车辆曲线通过性能的影响[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(4): 5-8.
- [3] 刘鹏飞, 翟婉明, 王开云, 等. 机车车辆通过缓和曲线时悬挂系统及轮重的动态特性[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 67-74.
- [4] 李军, 张云飞, 徐向阳. 悬挂参数对轨道客车小半径曲线通过的影响[J]. 机械设计与制造, 2020(9): 93-96.
- [5] BRUNI S, VINOLAS J, BERG M, et al. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context [J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7): 1021-1072.
- [6] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.

- [7] EN13906-1: 2002 圆形金属丝和棒材制圆柱螺旋压缩弹簧计算和设计[S].
- [8] 肖维雄. 二系螺旋弹簧刚度计算[J]. 铁道车辆, 2007, 45(4): 7-9, 45.
- [9] 秦剑生, 徐腾养, 邓国海, 等. 二系空簧横向刚度对高速列车动力学性能的影响[J]. 机械, 2018, 45(8): 6-9, 14.
- [10] 郭荣生. 螺旋弹簧—橡胶垫串联系统的减振性能[J]. 铁道车辆, 1990, 28(10): 14-21.
- [11] 刘丽, 张卫华. 金属弹簧刚度频变分析及等效算法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 24-27.
- [12] 孙文静, 宫岛, 周劲松, 等. 一系螺旋弹簧动刚度对车辆-轨道耦合振动影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 49-55.
- [13] 张名扬, 张开林, 姚远. 螺旋弹簧横向静刚度计算及动刚度频变分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 28-32.

收稿日期: 2021-09-27