

摄影测量技术在飞机结构件修理中的应用研究

王逾涯¹, 于海蛟^{1*}, 吕传景², 陈志刚³, 宋旻键³, 傅燕⁴

¹北京航空工程技术研究中心, 北京

²郑州辰维科技股份有限公司, 河南 郑州

³中国航空制造技术研究院, 北京

⁴空军装备部综合计划局, 北京

Email: *yunzeyu2000@163.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月2日; 发布日期: 2020年12月9日

摘要

某型飞机修理时发现多个翼面存在严重损伤, 且由于机翼整体产生了较大不可逆变形而无法按新品状态进行修理和更换。为解决再制造修理过程中的修理结构详细设计和装配定位及相邻翼面阶差等问题, 借助摄影测量技术开展了逆向建模等相关研究; 通过原位测量和离位测量相结合, 采用激光跟踪仪建立一级测控网、工业摄影测量建立二级控制网、三维激光扫描仪进行“填充式”扫描的方式, 快速高效获取了整体高精度扫描点云数据; 综合考虑部件局部结构修补和损伤形变等实际工况, 基于左右对称等原则利用点云数据进行型面重构, 实现了变厚度双曲面等复杂外形翼面结构高精度实体逆向建模; 基于数模完成了翼面结构再制造修理和机上模装验证等工作, 提高了大部件修理精度和装配效率。

关键词

摄影测量, 飞机, 航空部件, 再制造修理, 逆向建模

Application of Photogrammetry in Aircraft Components Repair

Yuya Wang¹, Haijiao Yu^{1*}, Chuanjing Lv², Zhigang Chen³, Minjian Song³, Yan Fu⁴

¹Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing

²Chenway Technology Co., Ltd., Zhengzhou Henan

³AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing

⁴Planning Bureau, Air Force Department of Equipment, Beijing

Email: *yunzeyu2000@163.com

Received: Nov. 17th, 2020; accepted: Dec. 2nd, 2020; published: Dec. 9th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 王逾涯, 于海蛟, 吕传景, 陈志刚, 宋旻键, 傅燕. 摄影测量技术在飞机结构件修理中的应用研究[J]. 机械工程与技术, 2020, 9(6): 562-569. DOI: 10.12677/met.2020.96060

Abstract

Several serious damages were detected on airfoils during the repair of a certain aircraft. And due to the large irreversible deformation of the wing as a whole, these airfoils could not be repaired and replaced as new state. In order to solve the problems during the repair process of remanufacturing, such as the detailed design of repair structure, assembly location and the step difference of adjacent airframes, the reverse modeling was carried out by means of photogrammetry. Through the combining of *in-situ* and *ex-situ* measurements, the first-level measurement and control network was established by laser tracker, the second-level control network was established by industrial photogrammetry, and a three-dimensional laser scanner was used for “filling” scanning. Finally, the overall high-precision scanning point cloud data was obtained quickly and efficiently. Considering the actual conditions such as local structural repair and damage deformation, the shape surface is reconstructed based on principles such as left-right symmetry, and the acquired point cloud data. And high-precision reverse modeling of complex shape wing structure, such as hyperboloid with variable thickness, is realized. Based on these mathematical models, the wing structure remanufacturing repair and in-flight model installation verification are completed, which improves the repair accuracy and assembly efficiency of large and complex shaped aircraft components.

Keywords

Photogrammetry, Aircraft, Aviation Parts, Remanufacturing, Reverse Modeling

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业摄影测量技术经过几十年的发展,在测量设备、软件等方面已经日趋成熟,测量精度、自动化程度不断提高,相机标定[1]-[8]、测量对象外形点云数据获取[9]-[15]、数据处理方法和逆向建模技术[16]-[22]等方面能力不断增强,以及多种测量手段的结合,使得该技术在国民生产众多领域得到广泛应用。在航空维修领域,工业摄影测量技术虽然也得到一定程度的应用[23] [24] [25],但范围有限,尤其在大型结构件维修中没有得到直接应用。而从原理上,工业摄影测量技术在大型航空结构部件维修过程中可以精确逆向建模及快速定位安装,在再制造修理等方面具有优势。

在某型飞机部分结构部件修理过程中,发现经过多年使用,机翼上扰流板等多个翼面蒙皮及内部结构损伤、变形严重,需采取再制造修理手段予以恢复,但型面参数已经偏离制造出厂时的理论值,离位修理后需要重新逆向建模确认实际型面阶差和装配关系等。同时为了了解不同飞机之间相同结构变形情况差别,以及修理工艺对结构形状变化的影响,需要获取原位变形情况、修理后变形情况并逆向建模,以实现修理后装配以及必要的串装可能性验证,指导后续相关修理工作的实施。

2. 研究内容

某型飞机部分结构件再制造修理过程中,为解决长期使用结构变形导致实际状态与原始设计状态偏离,需要重新确定结构件外形问题,以及不同翼面装配定位及相邻翼面阶差等问题,开展了待修理结构

的型面工业摄影测量技术有效性研究和结构详细设计建模技术研究。

针对涉及的变厚度双曲面、等厚度双曲面和等厚度平板等种类构件，设计了每一类结构的测量和建模方案，配置了相应的单相机摄影测量系统等多种高精度测量设备，分别完成了结构件型面及零部件的原位、离位测量，对测量数据进行分析处理后完成了逆向外形和零部件建模等工作。

3. 主要设备和软件

1) API 公司的 OT2 激光跟踪仪，测量精度 $18\ \mu\text{m} + 5\ \text{ppm}$ ，采用干涉法测距，测量范围一般 $< 50\ \text{m}$ 。

2) 辰维 MPS/S 单相机摄影测量系统，测量精度 $5\ \mu\text{m} + 5\ \text{ppm}\cdot\text{L}$ ，测量范围可达百米，4m 范围内单点测量精度优于 $0.025\ \text{mm}$ 。

3) Handyscan 700TM 手持扫描测量系统，精度 $0.030\ \text{毫米}$ ，分辨率 $0.050\ \text{毫米}$ ，使用三角测量法来实时确定自身与被扫描部件的相对位置。系统中 HandySCAN 3D 扫描仪随附 Vxelements 软件。

4) Metrascan 3DTM 扫描测量系统，包括 Metrascan 3D™ 光学 CMM 扫描仪及 C-Track 光学跟踪器，测量精度 $0.040\ \text{mm}$ ，分辨率 $0.050\ \text{mm}$ ，速率 20 万次测量/秒。

5) 采用 Geomagic Design X (原 Rapidform XOR) 作为逆向建模工程软件，实现对点云和扫描数据的处理，创建可编辑、基于特征的 CAD 数模并与 CATIA 等兼容。

4. 研究方法

4.1. 测量方法

对于部件的外形、骨架定位关系以及零件型面等的数据采集都采用点云扫描测量方法进行，测量方式分为“摄影测量 + 手持扫描”和“MetraSCAN 扫描仪 + C-Track 光学跟踪器”两种方式，根据工件情况选择其一或同时采用。

4.1.1. “摄影测量 + 手持扫描”方式

1) 在被测工件上粘贴扫描仪靶标若干，均匀布设编码标志点；

2) 利用 MPS/S 单相机摄影测量系统进行测量，获取被测工件上的点位坐标，建立工件全局测量坐标系；

3) 把摄影测量点坐标导入 HS700 手持扫描仪的 Vxelements 联机软件中，进行坐标系统一，设置扫描参数，开始多角度、全方位的扫描。此时工件所有的外形点云数据均被精确测量和保存在统一的摄影测量坐标系下。

4.1.2. “MetraSCAN + C-Track”方式

1) 在工件周围布设 5~10 个扫描仪专用的固定参考点；

2) 启动 MetraSCAN 扫描仪和 C-Track 光学跟踪器，配置好扫描参数。

则 C-Track 光学跟踪器实时追踪固定参考点的空间坐标，通过后方交会实时定位自身的相对空间位置和姿态，然后利用前方交会实时监测出 MetraSCAN 扫描仪的相对空间位置和姿态。MetraSCAN 扫描仪实时扫描出的工件点云数据则被实时统一至当前的固定参考点所建立的坐标系下。

4.1.3. “原位 + 离位”方法

采用部件原位测量和离位分解测量相结合方法，采用“激光跟踪仪测量系统”建立全局测量控制网，采用“MPS/S 单相机摄影测量系统”建立二级加密测量控制网，采用“快速扫描测量系统”进行部件的点云快速扫描测量工作。以下以原位测量为例进行叙述，离位测量方法过程基本相同，差别主要在于是以地面型架上所测零部件为中心构建测量坐标系并依此开展后续工作。

一、构建测量坐标系

- 1) 在飞机下方周围地面的不同高度上, 布设 8 个基座用于安放测量靶球, 位置如图 1 中的 C1~C8 所示。
- 2) 在飞机待测结构前后均匀固定 16 个夹具工装, 位置如图 1 中的 A、B 所示。
- 3) 在待测结构件及其附件区域均匀布设 6 mm 圆形靶标, 点间距约 80 mm, 然后在飞机结构上均匀布设摄影编码靶标。
- 4) 在 C1~C8 基座中间位置架设激光跟踪仪。
- 5) 利用激光跟踪仪和靶球分别精确测量出 C1~C8 的中心点三维坐标值。
- 6) 按右手坐标系建立整机全局测量坐标系。

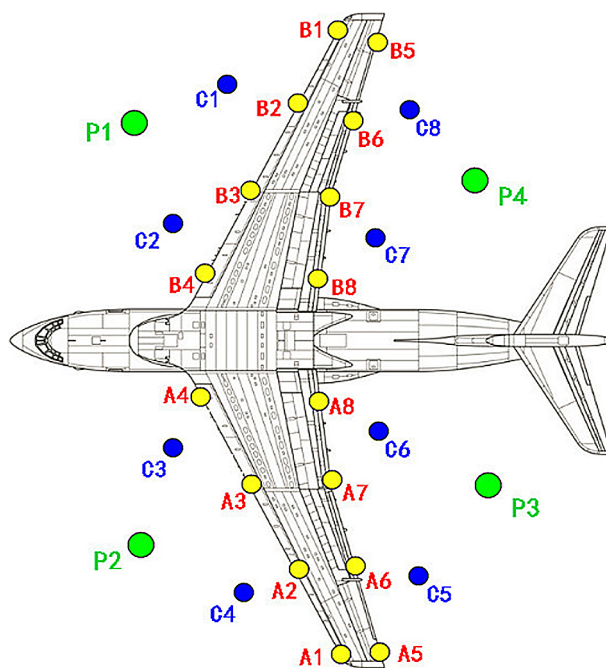


Figure 1. Arrangement of measure points
图 1. 测量点位布置示意图

二、建立首级测量控制网

- 1) 利用激光跟踪仪分别在图 1 的 P1~P4 位置分别测量 C1~C8 的中心点位三维坐标, 并采用“公共点转换法”统一至全局测量坐标系下。
- 2) 在 P1 站测量 B1~B4 点位, 在 P2 站测量 A1~A4 点位, 在 P3 站测量 A5~A8 点位, 在 P4 站测量 B5~B8 点位, 将 16 个点统一至全局测量坐标系下(参见图 2), 同时这 16 个点构成了首级测量控制网。

三、建立扫描测量控制网

- 1) 利用升降车和 MPS/S 单相机摄影测量系统对飞机机翼上的靶标点和基准点进行多个位置和角度的拍摄, 拍摄完成后将照片导入 MPS 软件, 解算出待测部位上所有的标志点位坐标。
- 2) 利用激光跟踪仪提供的 16 个基准点坐标值作为理论坐标, 进行公共点转换, 则可获得机翼上所有标志点在整机坐标系的坐标, 见图 3。该机翼上所有标志点坐标值可为下一步扫描测量提供全局测量控制。

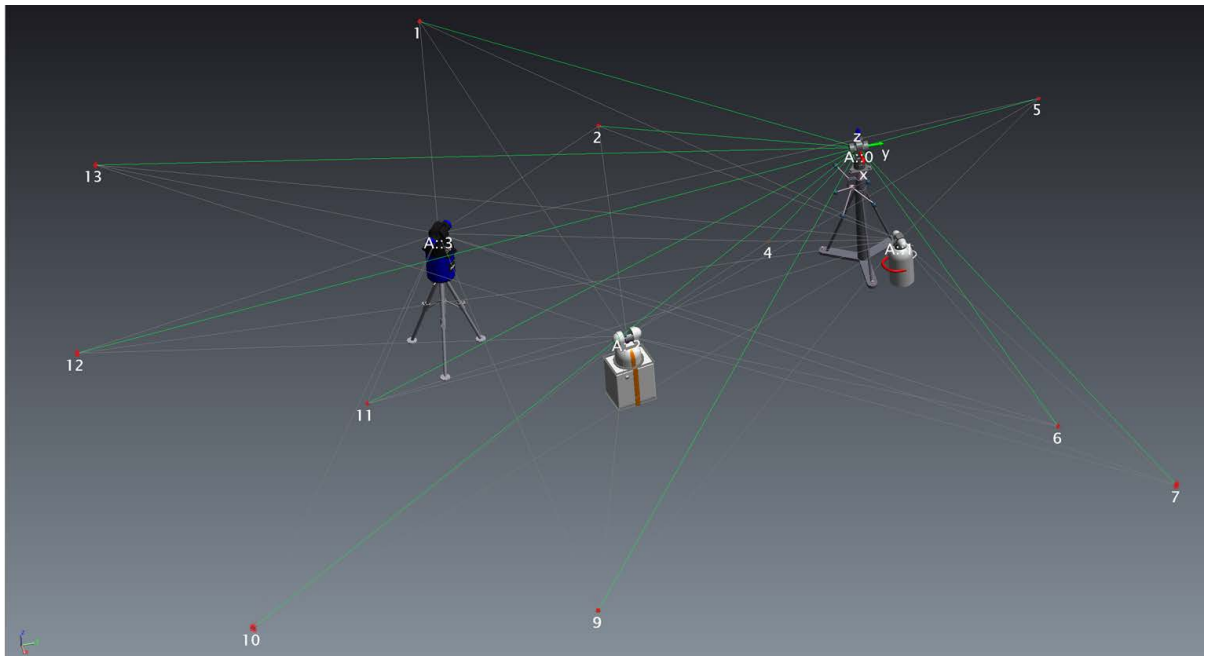


Figure 2. Sketch map of unified coordinates
图 2. 统一坐标系示意图

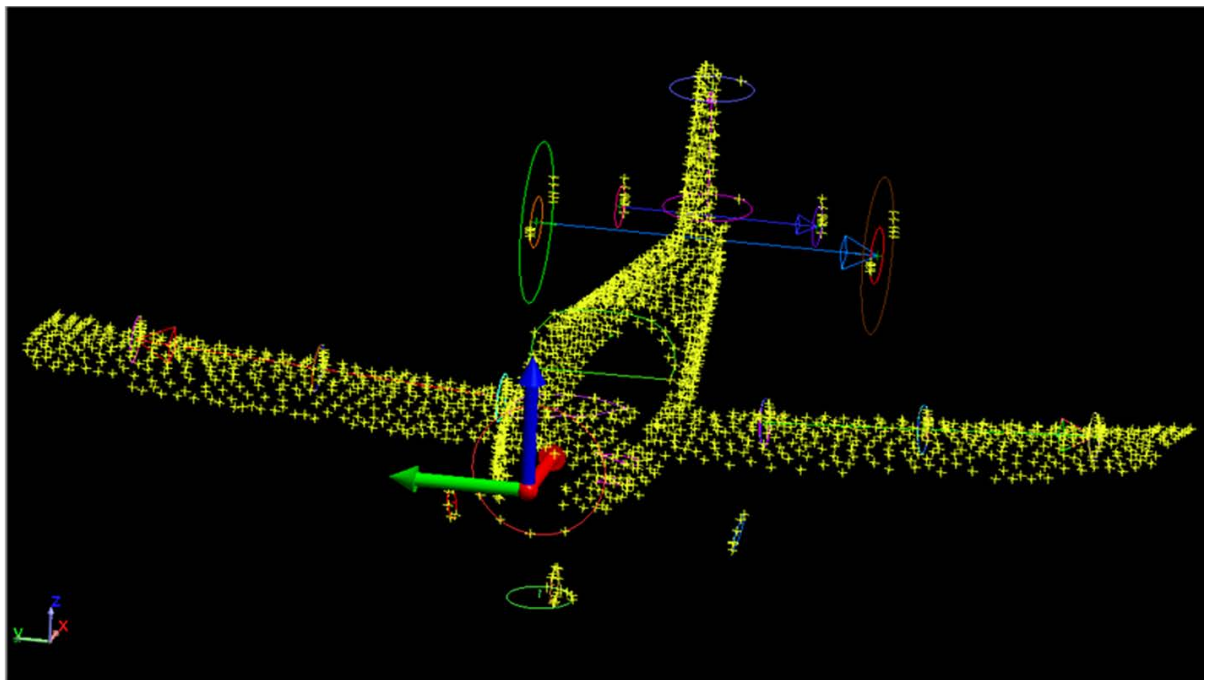


Figure 3. Sketch map of scanning net
图 3. 扫描测量控制网示意图

四、测量实施和数据复核

- 1) 将全局坐标系下的点位坐标等导入扫描仪采集软件中，从飞机的任意一个位置开始点云扫描测量，此时所扫描的数据均自动统一在飞机全局测量坐标系下。
- 2) 不论是原位测量和离位测量，测量过程当中定期进行测量状态复核。原位测量时，每 6 小时对 16

个基准点进行一次状态复核和确认。在地面进行部件离位测量时，每件部件均进行精度复核。精度复核方法为采用第三方已知精度的仪器设备对该测量仪器进行状态确认，以确保现场测量数据的准确与稳定。

4.2. 数据处理方法

4.2.1. 点云数据处理方法

在将获取的原始测量数据调正到统一坐标系之后，结合技术分析，进行初步适度光滑、去噪等操作进行数据简化和多余数据删除，并依据实际损伤情况、左右件对称、型面连续等原则对缺失的必要数据进行修补，实现网格处理，最后导出 stl 格式的数据用于后续建模。对点云数据的处理结果表明，一级控制中的跟踪仪测量误差均值为 0.01 mm，二级控制中的工业摄影测量误差 RMS 为 0.02 mm，满足建模需求。

4.2.2. 逆向模型方法

把 stl 格式数据导入到 Geomagic Design X 软件中，首先进行区域化处理，然后根据零件的类型选择精确建模或参数化建模，并确保满足依据母体装配关系组装后相邻构件之间不允许存在超限阶差、左右件分别进行逆向建模后镜像复核、满足型面精度等相应建模要求，最终导出至 CATIA V5。

逆向建模过程中，对测量数据进行有效性分析和修正，并对所选参数和方法进行多次复核确认，当部件建模完毕后，对每一个部件的测量数据和数学模型进行三维偏差分析，以确保建模成果的合理性和可用性，最后根据气动、强度等整体分析修正、确定数模，采用点云进行型面校核，通过外观检查保证表面光滑平整，无突变，无漏面，相邻部件连接部分无超限阶差等，通过将最终数据与原始扫描数据进行三维对比分析精度检查，结果如下：

1) 经复核分析，实际型面测绘公差 ± 0.2 mm，零件测绘公差 ± 0.2 mm，接头测绘公差 ± 0.05 mm，测绘精度满足要求。

2) 经修正的零部件外形数模与实际部件在接口区偏差 ± 0.2 mm，接头公差 ± 0.05 mm。数模能够反映钉孔等装配细节，并赋予了材料属性，满足相关结构件、零部件后续修理和装配需求。

机翼数模及质量检查示意图见图 4。

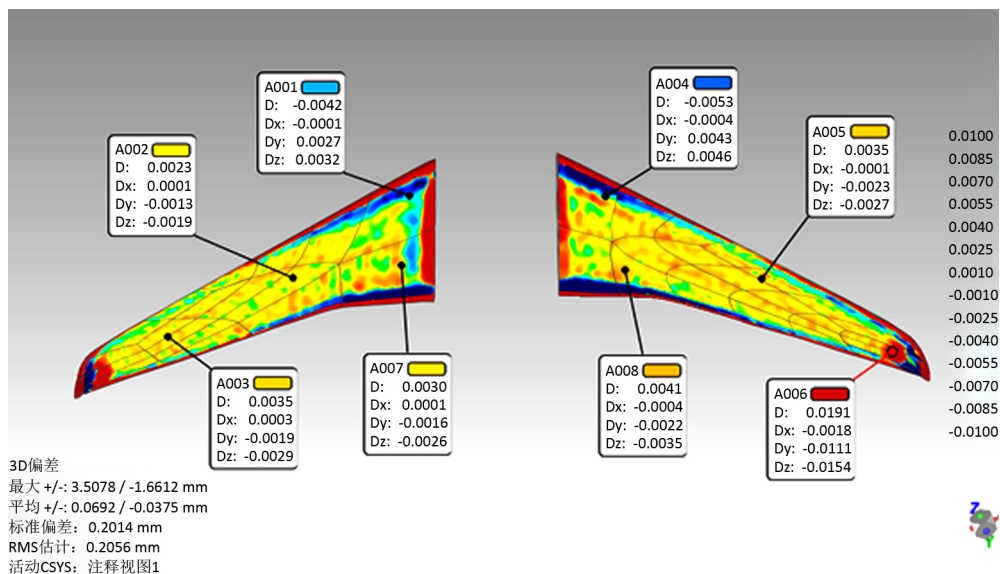


Figure 4. Reverse modeling of wings
 图 4. 机翼数模示意图

依据原位测量结果,得到了飞机经多年使用后机翼各主要型面的实际变形情况,以及相邻型面实际阶差数据等,为判断是否可修及部件修理后相关型面参数的提出提供了技术依据。

利用建立的数模,一方面实现了修理工装设计和修理结构件的详细设计,科学控制了型面精度和结构再制造修理重量重心等参数,同时为出厂质量检验提供了标准和依据;另一方面对修理后结构件进行了机上模装验证,证明了设计数模的型面较好的与机身骨架贴合并且与相关安装孔位吻合,符合装机要求,提高了维修后大部件装配的精度和效率。

5. 结论

1) 采用激光跟踪仪建立一级测控网、工业摄影测量建立二级控制网、三维激光扫描仪进行“填充式”扫描的方式,融合了多种测量方法的优势,实现了快速高效获取被测工件整体高精度扫描点云数据的目的。

2) 通过坐标调正、网格化、三维偏差分析等基本手段,综合考虑部件局部修补、损伤形变等实际情况,基于左右对称原则利用点云数据进行型面重构,实现了大型复杂型面结构高精度实体建模目的。

3) 在大型复杂型面航空结构部件修理中,利用工业摄影测量技术实现逆向建模并应用于修理件详细设计、工装设计、安装定位等工序,能够显著提高维修精度和装配效率,技术应用前景广阔。

参考文献

- [1] 黄桂平. 圆形标志中心子像素定位方法的研究与实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(5): 388-391.
- [2] 王建荣, 王任享, 胡莘. 基于 LMCCD 影像的相机参数在轨标定[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 984-989.
- [3] 李巍, 董明利, 孙鹏, 等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2053-2060.
- [4] 李占利, 刘梅, 孙瑜. 摄影测量中圆形目标中心像点计算方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 77-83.
- [5] 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.
- [6] 薛婷, 郝继贵, 吴斌, 等. 自由曲面数字化测量中粘性目标的设计及定位[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 102-105.
- [7] 朱伟东, 曹良洪, 梅标, 等. 利用圆心不对称投影精确标定工业相机[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2267-2273.
- [8] 冉险生, 林立, 黄泽好. 近景摄影测量在三维数据采集中的应用[J]. 现代制造工程, 2013(3): 106-110.
- [9] 赖喜德, 李广府, 张惟斌, 等. 涡轮叶片逆向建模与特征参数提取[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 915-920.
- [10] 张继贤, 林祥国, 梁欣廉. 点云信息提取研究进展和展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1460-1469.
- [11] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 311-318.
- [12] 张雨禾, 耿国华, 魏潇然, 等. 保留几何特征的散乱点云简化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(9): 1420-1427.
- [13] 张旭东, 吴国松, 胡良梅, 等. 基于 TOF 三维相机相邻散乱点云配准技术研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 8-16, 23.
- [14] 李斌, 魏俊博, 马博超, 等. 不规则体体积计算三维激光点云切片法[J]. 测绘学报, 2019, 48(1): 42-52.
- [15] 葛宝臻, 周天宇, 陈雷, 等. 基于改进 ISS 特征点与人工蜂群算法的点云拼接方法[J]. 天津大学学报, 2016, 49(12): 76-82.
- [16] 钦桂勤, 黄桂平, 张永生. 双介质摄影测量共线理论研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(3): 87-94.
- [17] 保善英. 测量过程控制的期间核查初步探讨[J]. 航空维修与工程, 2017(8): 56-59.
- [18] 雷宗山, 杨武奎. 基于逆向测量法的某型空气发生器导管设计与制造[J]. 航空维修与工程, 2019(4): 52-53.
- [19] 黄桂平, 轩亚兵, 马彤彤. 双相机工业摄影测量系统测量性能测试方法研究[J]. 中国测试, 2016, 42(5): 6-10.
- [20] 张小辉, 吴传贵, 王纬国, 等. 基于四线制的电阻自动测量研究与实现[J]. 航空维修与工程, 2020(4): 42-45.

-
- [21] 熊香友. 基于近景摄影测量的逆向工程测量技术研究[J]. 机械工程师, 2016, 299(5): 77-79.
- [22] 农宏海, 曾令嫒, 吴学岗, 等. 涡轮叶片叶冠扭转角三坐标测量方法研究[J]. 航空维修与工程, 2020(4): 100-102.
- [23] 班建华, 汪西, 刘思仁, 等. 组合式测量技术在飞机部件形位检测中的应用[J]. 现代制造工程, 2019(2): 100-104.
- [24] 李磊刚, 梁晋, 唐正宗, 等. 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1929-1938.
- [25] 彭艳敏, 党建卫, 蔡渊. 基于综合切面模线的飞机零件逆向建模[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 87-90.