

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.07

基于模型驱动的激光跟踪扫描测量仪 自动曲面测量技术

李严, 张伟*, 孙安斌, 范帅鑫, 孟宇航

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对飞机装配过程中大量曲面部件的外形轮廓快速检测需求, 提出了一种基于激光跟踪扫描仪的自动测量方法, 首先通过对象模型提供的理论定位点将测量设备与被测对象坐标系对齐, 其次按照对象的被测曲面特征要求, 规划设备的测量路径并自动采集完整的对象被测曲面特征数据, 之后将实测数据与理论数模再次精细对齐, 最终计算曲面轮廓偏差。利用直径为4 m的大型旋转抛物面进行实验, 结果表明: 该方法显著提升了测量的自动化水平, 与传统人为控制的测量方法相比, 扫描效率提升约30%, 且测量结果一致, 为推动航空设备曲面部件几何量高效检测技术发展提供了有力支撑。

关键词: 飞机装配; 复杂结构件; 曲面轮廓; 旋转抛物面; 激光跟踪; 自动采集; 扫描测量; 模型驱动
中图分类号: TB92; V21; O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 02-0090-11

Automatic curved-surface measurement technology using laser tracking scanners based on model-driven approach

LI Yan, ZHANG Wei*, SUN Anbin, FAN Shuaixin, MENG Yuhang

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To address the demand for rapid profile inspection of a large number of curved-surface components during aircraft assembly, the research team proposed an automated measurement method based on a laser tracking scanner. First, the coordinate systems of the measuring equipment and the measured object are aligned using the theoretical positioning points provided by the object model. Second, the measurement path of the equipment is planned according to the requirements of the measured curved-surface features of the object, and the complete feature data of the measured curved-surface of the object are automatically collected. Then, the measured data are finely aligned with the theoretical digital model for a second time. Finally, the deviation of the curved-surface profile is calculated. An experiment was conducted using a large-scale rotating paraboloid with a diameter of 4 meters. The results show that this method significantly improves the level of measurement automation. Compared with the traditional manual measurement method, the scanning efficiency is increased by approximately 30%, and the measurement results are consistent. This study provides strong support for advancing the development of high-efficiency geometric quantity inspection technology for curved-surface components of aviation equipment.

Key words: aircraft assembly; complex structural component; curved surface profile; rotating parabolic surface; laser tracking; automatic data acquisition; scanning measurement; model-driven

收稿日期: 2025-09-22; 修回日期: 2025-12-10; 录用日期: 2025-12-19; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 工业和信息化部“十四五”民用飞机专项科研项目(MJZ3-4N22)

引用格式: 李严, 张伟, 孙安斌, 等. 基于模型驱动的激光跟踪扫描测量仪自动曲面测量技术[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 90-100.

Citation: LI Y, ZHANG W, SUN A B, et al. Automatic curved-surface measurement technology using laser tracking scanners based on model-driven approach[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 90-100.



0 引言

在飞机装配过程中,测量是确保产品符合设计标准的关键环节^[1-2]。随着航空技术的持续发展,各航空企业正积极推动数字化测量技术的落地应用,该技术已成为航空装配环节中保障精度、规避装配偏差的核心支撑力量^[3-5]。飞机装配过程中存在大量需定位扫描的部件(如拉型模工装、大型壁板等),这些部件的外形轮廓误差直接影响产品的性能,目前扫描测量这些部件时仍以人工操作为主,这种方式严重依赖测量人员的经验,难以保障测量结果的稳定性和一致性。为推动航空制造业向智能制造转型,国内外学者开展了大量关于自动测量技术的探索^[6-8]。

在自动化测量技术发展的早期,三坐标测量机曾得到广泛应用^[9-11],专业技术人员编制测量程序,三坐标测量机根据测量程序可自动执行测量任务。但进行大量航空曲面部件测量时此类方法的成本较高,且进行大型曲面检测时效果也不尽理想。基于此,研究人员针对其他类型的自动测量技术开展探索。肖婧^[12]为解决某大型飞机部件的复杂曲面轮廓测量问题,利用激光雷达,基于PolyWorks结合宏脚本编译器自动取点,再利用Spatial Analyzer(SA)的二次开发功能,建立了适用于大部件的单站位数字化测量程序;刘盼等人^[13]针对发动机叶片中变形较大无法利用设计基准完成测量的截面,提出一种利用四点拟合快速建立辅助坐标系的算法实现扫描;张双双^[14]使用逆向扫描技术扫描蒙皮曲面变形处点云信息,将其构建成实际曲面,并与理论曲面进行对比,从而得出扫描处的误差信息;张泽^[15]提出一种基于结构光三维扫描的飞机蒙皮外形测量方法,研究了特征检测、扫描路径规划和测量数据处理与分析等关键技术;SHI J L等人^[16]针对大型物体的测量问题,提出一种激光测距仪与扫描仪相结合的方式。JIANG T等人^[17]研发了一种激光扫描仪跟踪测量系统,并通过实验验证了该系统的有效性。然而,上述方法在实际应用中仍然存在局限性,如控制难度高、系统灵活性差等,此外进行曲面变形小、数量庞大的飞机装配曲面部件测量时适配性受限。

针对上述问题,本研究团队以激光跟踪扫描仪Leica ATS600为核心,依托SA预留开发接口完成二次开发,研发飞机装配曲面测量自动定位与扫描系统,该系统集成被测产品数模解析、设备控制、数据处理等模块,实现产品数模导入、自动定位扫描、点云处理及轮廓偏差分析的全流程自动化闭环,降低对操作者专业技能的依赖,大幅提升测量效率,为飞机装配曲面质量检测提供可靠高效的技术支撑。

1 曲面测量原理

飞机装配中存在大量曲面,这类曲面的共同点是包含定位点与扫描区域,如图1所示。

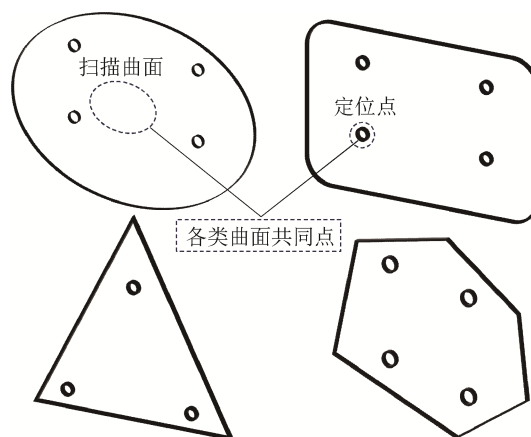


图1 不同种类曲面示意图

Fig.1 Diagram of different types of curved surfaces

激光雷达常用于大部件外形测量,虽然其曲面扫描精度较高,但点位测量精度不及激光跟踪仪(定位点对后续转换至关重要),且造价高、笨重、应用门槛高。因此,本文选用可直接扫描的Leica ATS600激光跟踪扫描仪,其能快速连续自动化采集曲面数据,最大定位测量半径80 m、最大扫描半径60 m,可满足大型部件全尺寸测量需求。搭配高精度反射球,该设备可实现微米级高精度定位测量,充分契合航空航天等领域的严苛要求。

激光跟踪扫描仪的工作原理如图2所示。定位测量时,在目标处安装靶球,激光跟踪扫描仪内部激光器产生的激光射至靶球中心后返回,结合测距系统的测距值与圆光栅编码器的测角值,可计算出目标点在激光跟踪扫描仪设备坐标系下的

空间坐标 (x_1, y_1, z_1) , 具体计算公式为

$$\begin{aligned}
 x_1 &= L \cdot \cos V \cdot \cos H \\
 y_1 &= L \cdot \cos V \cdot \sin H \\
 z_1 &= L \cdot \sin V
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中： L 为目标点到跟踪扫描仪的距离， H 为水平角， V 为俯仰角。

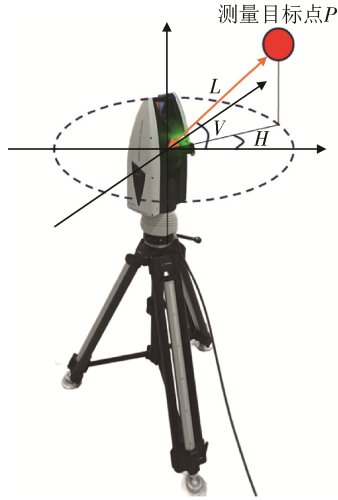


图2 激光跟踪扫描仪测量原理

Fig.2 Measurement principle of laser tracking scanner

在扫描测量时，不需要目标靶球，激光器发射激光直接射向被测物体表面，经漫反射后，部分反射光回到激光跟踪扫描仪，计算得到激光跟踪扫描仪到物体表面的距离。

SA是一款可追溯的图形化计量软件包，广泛应用于航空航天等领域。激光跟踪扫描仪与SA软件在飞机大部件装配测量行业中的结合，可有效满足工程实际应用需求。然而，SA软件操作相对复杂，操作路径不同会导致得到的测量结果有所不同，其函数的处理方式大多非参数化，因此不适用于批量测量^[18]。针对上述问题，本研究团队对SA软件进行二次开发，研究适用于飞机装配曲面测量的自动定位与扫描系统。

2 曲面自动定位与扫描测量系统总体架构

曲面自动定位与扫描测量系统，围绕4大核心模块构建，如图3所示，其中设备信息编辑模块实现测量仪器添加、连接与配置；测量特征提取模块导入曲面理论模型及定位点，明确测量基准；测量过程控制模块执行定位点测量与曲面扫描，驱动自动化作业；测量数据处理模块通过拟合计

算、关系匹配分析数据，获得测量结果并输出报告。

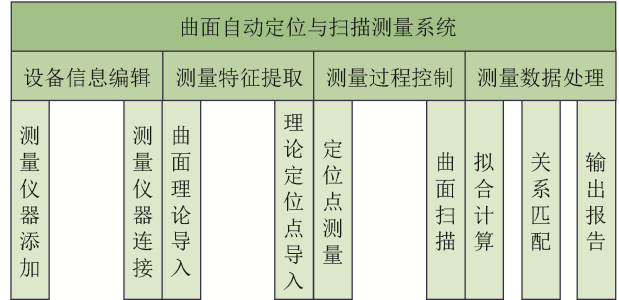


图3 自动定位与扫描系统总体架构

Fig.3 Overall architecture of the automatic location and scanning system

利用SA的Measure-Plan(MP)工具编制测量计划，如图4(a)所示；结合软件提供的二次开发工具SDK(Software Development Kit)，为激光跟踪扫描仪硬件定制开发测量过程控制与数据处理程序，实现复杂测量逻辑与设备协同控制，如图4(b)所示。通过SA软件的二次开发实现测量流程自动化与测量方法普适化，既可解决部件曲面测量效率低的问题，缩短整机交付周期；又可解决不同种类曲面的适用性问题。

3 系统实现路径

本系统以SA内置编程接口为核心技术支撑，实现路径如图5所示。首先筛选适配接口函数构建标准化MP测量计划方案，将其转化为VB代码，然后依托SA软件的SDK程序包，在C#开发环境下构建交互控件，封装后可直观呈现界面布局与功能分区。

具体实现路径如下：

1) MP测量脚本开发

基于SA脚本环境，针对部件曲面定位扫描需求，开发自动化测量逻辑，封装为.mp文件，可直接供SA调用。

2) SDK程序整合

从SA的MP计划编辑页提取功能代码片段，整合至SDK框架并调试，实现测量核心逻辑与外部程序深度衔接。

3) SA环境运行

通过SDK通信接口建立外部程序与SA的实时

0	Step Comment	<This script demonstrates the use of comparison commands to make decisions.>
1	Step Comment	<It also introduces the concept of retrieving user input through "Ask for User Decision" commands.>
2	Create Counter	<Score: How many correct answers have we entered?>
3	Make a System String	<Get current year as a string.>
4	Make an Integer from String	<The current year as an integer.>
5	Get Integer Variable	<Standing year = 1984.>
6	Ask for Integer	<What year was NPK founded?>
7	Integer Comparison	<If guess == 1984, ...>
8	Integer Comparison	<If guess < 1984, ...>
9	Ask for User Decision Extended	<Too low.>
10	Ask for User Decision Extended	<Too high.>
11	Increment Counter	<Increment the score.>
12	Notify User Test Answer	<Correct.>
13	Ask for User Decision Extended	<Where may SA unveiled?>
14	Increment Counter	<Correct: increment the score.>
15	Ask for User Decision Extended	<Correct?>
16	Notify User Test Answer	<Wrong obj?>
17	Ask for User Decision (Full-Down Version)	<Combined letters in first name?>
18	Increment Counter	<Correct: increment the score.>
19	Ask for User Decision Extended	<That's right?>
20	Notify User Test Answer	<Wrong obj?>
21	Ask for User Decision Extended	<Word count question?>
22	Increment Counter	<Correct: increment the score.>
23	Concatenate Strings	<Build "correct" string.>
24	Ask for User Decision Extended	<Correct?>
25	Notify User Test Answer	<Nope!>
26	Integer Comparison	<Perfect score? (4 correct answers)>
27	Ask for User Decision Extended	<Perfect score?>
28	Make String from Integer	<Current score.>
29	Integer Comparison	<If score > 11, meaning it's 2 or 3?>
30	Concatenate Strings	
31	Ask for User Decision Extended	<Not too bad?>
32	Concatenate Strings	
33	Ask for User Decision Extended	<Not too bad?>
34	Exit Measurement Plan	

(a) MP测量计划
(a) MP measure-plan

```

void SetConnectionStatus ()
{
    if (IsSARunning ())
    {
        SA_Running_Status_btn.BackColor = Color.LightGreen;
        SA_Running_Status_btn.Text = "SA Running";
    }
    else
    {
        SA_Running_Status_btn.BackColor = Color.OrangeRed;
        SA_Running_Status_btn.Text = "SA Not Running";
    }
    if (sa != null && sa.IsSDKConnected ())
    {
        ConnectToSA_btn.BackColor = Color.LightGreen;
        ConnectToSA_btn.Text = "Connected";
    }
    else
    {
        ConnectToSA_btn.BackColor = Color.OrangeRed;
        ConnectToSA_btn.Text = "Not Connected";
    }
}

```

(b) SDK开发程序
(b) Software development kit

图4 SA软件MP及SDK二次开发示意图

Fig.4 Schematic diagram of MP & SDK secondary development in SA software

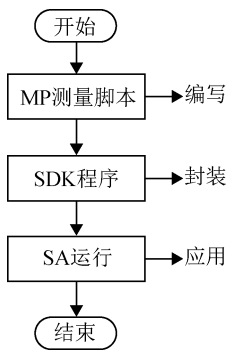


图5 系统设计总体思路

Fig.5 Overall approach of system design

连接，按预设流程调用执行模块，实时监测SA稳定性，完成曲面点云采集、定位特征测量及偏差分析等核心任务。

4 基于SA的自动测量规划

4.1 待测对象曲面特征

选取大型旋转抛物曲面部件作为测量对象，如图6所示，其具有显著的曲率变化、颜色差异、漫反射率差异，同时曲面上还设有定位点，其总体特性与工业场景中多类关键装配部件高度契合，可作为技术研究的典型样本。

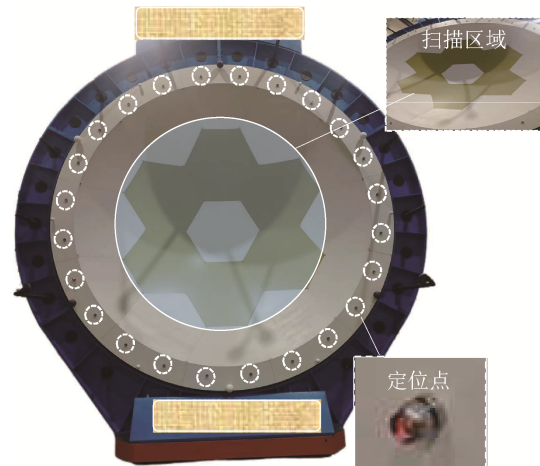


图6 待测曲面说明

Fig.6 Description of the curved surface to be measured

该部件有完整的理论数模和精准定位点坐标。在测量逻辑上，定位点是测量基准，可构建专属坐标系，统一实测数据至全局或理论坐标系；曲面是扫描的关键，通过实测扫描数据与理论数模比较分析，可计算出曲面轮廓偏差，结果可为机身对接等扫描测量提供参考精度。

4.2 测量规划流程

测量规划^[19]是针对测量对象的检测特征，制定含公差要求、设备选型、数据采集路径规划、数据分析与处理算法的完整测量步骤。其核心价值在于：固化标准化流程，避免因操作人员的测量路径差异产生系统误差，减少重复试错，提升测量效率与数据一致性。

详细的测量规划流程分4步，如图7所示，包括测量准备、测量实施、拟合转化、数据分析。

1) 测量准备

部署并校准激光跟踪扫描仪Leica ATS600，确保设备状态良好；在曲面定位点布置靶球；将仪器安置于与曲面中心等高位置，优化光路以降低

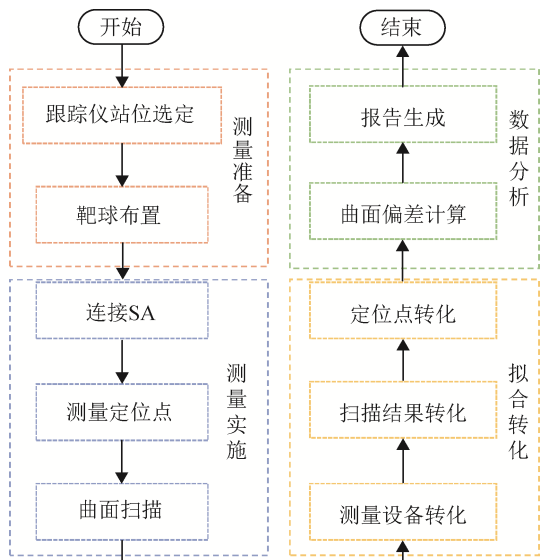


图7 测量规划流程系统设计总体思路

Fig.7 Overall design idea of the measurement planning process system

精度损失。

2) 测量实施

启动MP计划或SDK程序，建立与激光跟踪扫描仪的稳定通信，依次完成定位点精确测量与曲面全面扫描，获取三维坐标及高密度点云，保证原始数据的完整有效。

3) 拟合转化

依托程序集成的最佳拟合算法，匹配定位点实测与理论坐标，实现坐标系对齐，同步完成曲面点云及设备空间参数的坐标转化，确保数据与理论数模基准一致。

如图8所示，拟合转化考虑的问题是：激光跟踪扫描仪测量坐标系与曲面自身坐标系不重合，

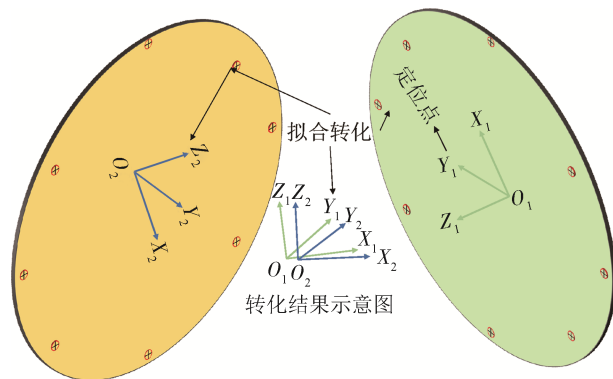


图8 转化过程示意图

Fig.8 Conversion process diagram

需借助定位点实现曲面从实测坐标系到理论坐标系的转化。

4) 数据分析

将转化后的点云扫描数据与理论模型进行关系匹配，如图9所示。根据匹配优化结果逐点分析误差，形成轮廓偏差量化图，同时整合误差结果、测量参数、设备状态，形成标准化测量输出报告，为工装评估、调整及质量追溯提供依据。

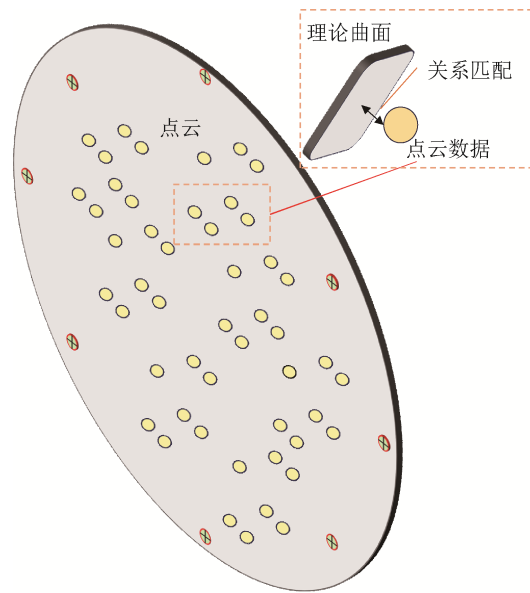


图9 关系匹配示意图

Fig.9 Relationship diagram

4.3 系统实施方案

基于SDK程序开发的系统操作界面如图10所示。该系统支持两种操作模式，既可直接调用MP测量计划执行任务，也可通过SDK程序实现全流程控制。考虑实际应用中对自动化检测效率的需求，SDK程序设计了“一键测量”功能，操作者点击该按钮后，系统会自动触发预设的测量流程，实现“一键启动、自动完成”；SDK程序还对整体流程设计进行了结构化细分，将自动化过程拆解为“测量准备”“测量实施”“数据分析”三个功能模块。这种流程设计不仅便于操作者根据实际需求灵活调用单一功能，还能让使用者更直观地理解自动化流程的内在逻辑。

4.3.1 “测量准备”的操作流程

1) 添加设备并连接

测量仪器的添加与连接操作，是系统启动后



图10 SDK界面
Fig.10 SDK interface

的基础配置环节。如图11所示，打开SA的仪器添加界面(Add New Instrument)，选择需要添加的设备(如激光跟踪扫描仪)后，完成新仪器的添加；然后自动打开仪器接口控制界面(Start Instrument Interface)，建立与激光跟踪扫描仪的通讯连接，从而实现设备与系统的实时数据交互。

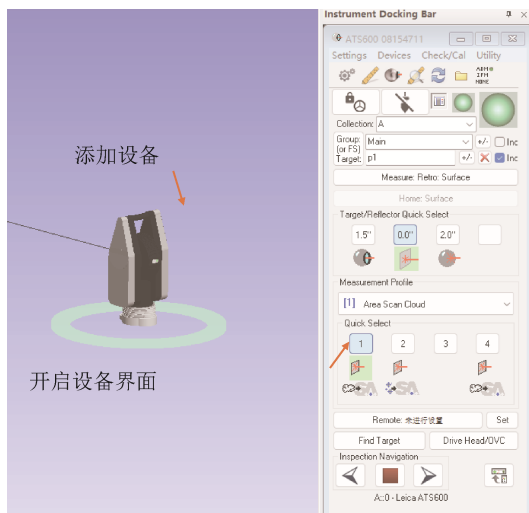


图11 添加设备并连接界面
Fig.11 Interface for adding and connecting devices

在实际设备连接过程中，若测量设备已固定为某型号设备，如ATS600，系统可不再为操作者提供测量仪器的选择入口，省去设备类型筛选的环节。操作者仅需在指定输入框中准确填写ATS600的IP地址即可。

2) 导入理论数模与理论定位点

为了保证测量设备坐标系与被测对象的设计

坐标系对齐，需要预先完成理论数模与对应定位点的导入，如图12所示。调用SA的“Direct CAD Access”命令实现数模加载，该命令支持直接读取主流CAD格式文件，能完整保留数模的几何特征，确保导入的理论模型与设计模型的数据一致。

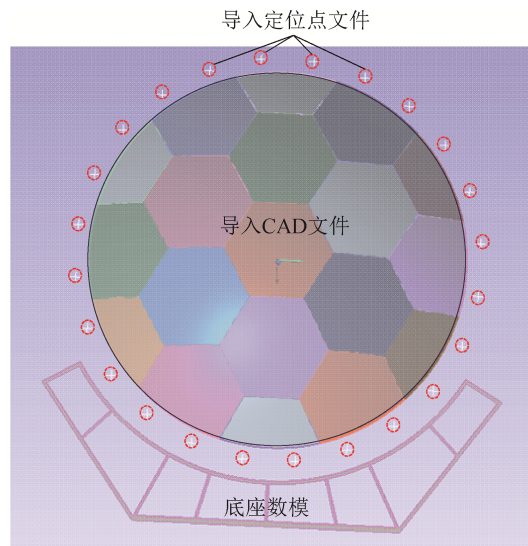


图12 数模与定位理论点导入
Fig.12 Import of digital model and theoretical positioning points

定位点的导入采用点名+点坐标的标准化信息格式，以txt文本格式存储，如表1所示。该格式文件的导入对应SA中的“Import ASCII: Predefined Formats”命令，该命令可自动识别txt文件中按预设格式排列的定位点数据，实现坐标信息的批量导入，避免手动输入有可能导致的误差。需要注意的是定位点坐标的单位默认为SA软件设置的单位。

为保证上述功能正确执行，集成了文件浏览“Browse for File”命令作为辅助功能，执行该命令

表1 部分定位点坐标

Tab.1 Partial positioning point coordinates

定位点	x/mm	y/mm	z/mm
P_1	807.652	-1 959.226	25.937
P_2	1 287.199	-1 683.596	25.845
P_3	1 680.451	-1 292.676	26.054
P_4	1 958.912	-813.210	27.508
P_5	2 102.303	-278.820	26.512

可触发文件浏览对话框，支持操作者直观选择本地存储的数模文件或定位点txt文档，提升了导入操作的便捷性与准确性。

4.3.2 “测量实施”的操作流程

“测量实施”的操作可按照定位与扫描测量2种模式进行选择。

1) 定位测量

选择定位点测量环节，系统通过调用SA的“Auto Measure Points”命令实现自动化测量。该功能支持2种操作模式：① 多点自动测量，可按预设顺序依次完成批量定位点的连续采集(见图13)；② 单点手动选择测量，操作者可通过界面交互指定特定点位单独测量，灵活适配不同场景需求。

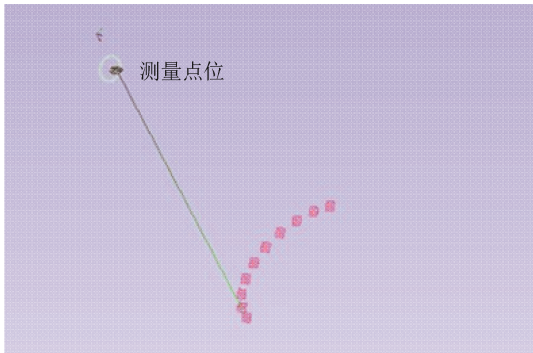


图13 定位点测量示意图

Fig.13 Schematic diagram of positioning point measurement

2) 扫描测量

在曲面扫描环节，操作人员进入曲面测量专用界面后，可根据实际检测需求灵活划定待扫描区域，如图14所示，既可进行整体大范围扫描，也可聚焦于局部关键区域进行小范围扫描。扫描区域选择完成后，需依次配置测量参数，系统调用SA软件的“测量界面参数”设定界面，确定测量方式、设定扫描边界、定义测量精度等级、调整扫描密度等。待所有参数设置完毕后，操作人员保存当前配置并返回至测量主流程，系统自动向激光跟踪扫描仪发送指令，启动预设区域的自动化扫描作业，实时采集曲面三维数据并传输至系统，完成从参数配置到数据采集的无缝衔接。

4.3.3 “数据分析”的操作流程

1) 拟合计算

当定位点测量与扫描区域数据采集完成后，需进行坐标系拟合，目的是解决测量过程中测量

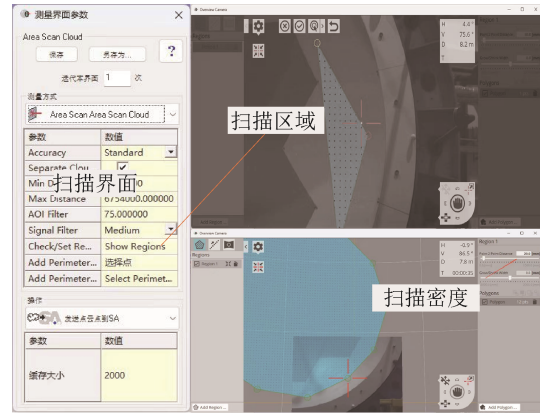


图14 曲面扫描设置界面

Fig.14 Curved surface scanning settings interface

设备与被测对象坐标系不统一的问题，为后续表面轮廓误差评价奠定基础。具体而言，激光跟踪扫描仪在测量时会基于自身建立的设备坐标系生成定位点实测数据与曲面扫描点云，而曲面理论数模则基于产品设计阶段的设计坐标系而构建。由于2个坐标系的基准、轴向定义存在差异，若直接进行数据比对，会因坐标基准不统一导致误差评价结果失真，无法反映真实的曲面轮廓偏差。

设 $O_A X_A Y_A Z_A$ 为设备坐标系， $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ 为产品坐标系，如图15所示，可通过 $P_1 \sim P_6$ 定位点的实测值和理论值将设备坐标系转换到产品坐标系^[20]。 (x, y, z) 表征设备坐标系在产品坐标系下的位置参数，姿态参数 (α, β, γ) 采用欧拉角描述，旋转顺序为：先绕 Z_0 轴旋转 α 角，再绕 Y_0 轴旋转 β 角，最后绕 X_0 轴旋转 γ 角。

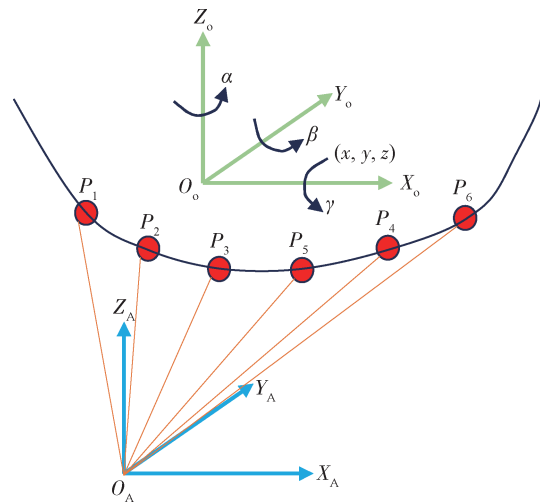


图15 坐标转换示意图

Fig.15 Schematic diagram of coordinate transformation

设第*i*个定位点在产品坐标系中的理论坐标为 p_{oi} ，在设备坐标系中的实测坐标为 p_{Ai} 。为求解最佳转站参数，需构建*n*个定位点的距离误差平方最小二乘函数*f*，即

$$f = \min \sum_{i=1}^n \| p_{oi} - (Rp_{Ai} + T) \|^2 \quad (2)$$

式中： R 为旋转矩阵， T 为平移矩阵。

R 计算公式为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

T 计算公式为

$$T = [x \ y \ z]^T \quad (4)$$

转换矩阵的计算方法较多，其中奇异值分解法较为成熟，可用于求解式(2)；该方法的不足在于未对误差进行补偿，详细求解过程见文献[21]。

设 p_{Ai} 转换到产品坐标系下的坐标点为 p'_{oi} ，有

$$p'_{oi} = Rp_{Ai} + T \quad (5)$$

该点的转换误差*e*为

$$e = p'_{oi} - p_{oi} \quad (6)$$

进行“拟合计算”时，系统调用SA软件中的“Locate Instrument (Best Fit-Group to Group)”命令执行拟合操作，如图16所示。选定定位点的理论坐标与实测坐标，两者进行最优匹配拟合，通过算法计算出2个坐标系间的转换矩阵(包含平移、旋转参数)；接收拟合结果后，选定测量仪器以及由该仪器扫描获取的曲面点云数据进行统一转换。转换后曲面实测点云数据与曲面的理论数模对齐。

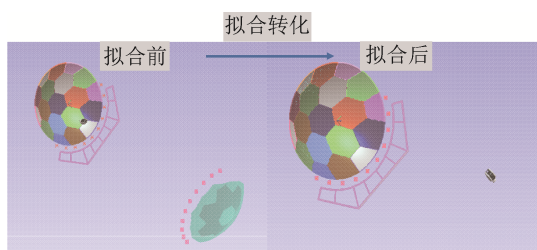


图16 测量拟合界面

Fig.16 Measurement and fitting interface

2) 曲面表面整合

完成坐标系拟合后，即可进入曲面数据分析阶段，也称为关系匹配。导入系统的曲面理论数模并非单一整体，而是由多个独立的子曲面离散构成，若直接基于离散数模进行数据分析，易出现数据关联断层，无法精准匹配扫描区域的实测点云数据，因此，需要通过两步操作完成数模预处理：

第一步，调用SA软件中的“Construct Surface by Dissecting Surface(s)”命令构建目标分析表面。由于实际扫描可能仅覆盖曲面的部分区域(非完整数模)，操作时无需选取全部离散子曲面，只需结合前期划定的扫描边界，在离散数模中精准截取与扫描区域对应的子曲面片段即可。

第二步，执行SA软件中的“Construct Surface From a Collection of Surfaces”命令，对截取后的子曲面片段进行整合。该命令可将第一步中选取的多个离散子曲面片段合并为一个完整的、连续的理论表面整体，消除子曲面间的离散边界，形成统一的理论基准面，如图17所示。

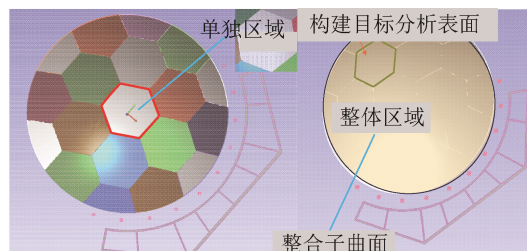


图17 曲面表面整合

Fig.17 Curved surface integration

3) 关系匹配

关系匹配的目标是建立实测点云数据与理论表面数模之间的精准关联，如图18所示。系统通过调用SA软件中的“Make Point Clouds to Objects Relationship”命令，自动建立点云中采样点与理论表面集合的对应关系，并给出分析结果。

4) 生成报告

在完成点云与理论表面的关系匹配并获取分析结果后，需通过生成报告环节实现测量成果的可视化呈现，这也是整个测量流程的收尾步骤。具体操作为：首先调用“Make New SA Report”命令创建一份新的分析报告，为后续结果整合提供结构化载体；随后，执行“Add Item to SA Report”

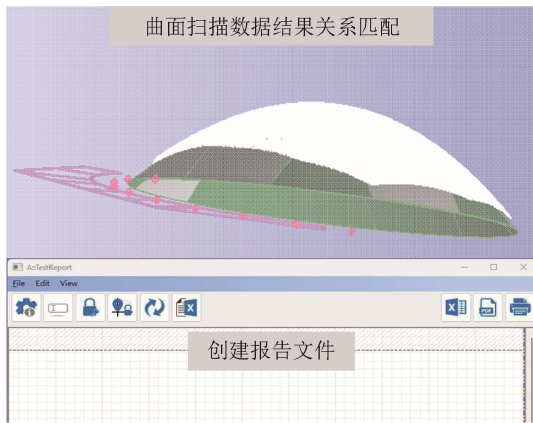


图 18 点云匹配结果及报告生成

Fig.18 Point cloud matching results and report generation

at Location”命令，将前期得到的关系匹配结果按预设逻辑精准嵌入报告中。

至此，从设备连接、数模导入、定位点测量、曲面扫描到坐标系拟合、表面整合、关系匹配，再到最终报告生成的全流程自动化测量任务已完整闭环，不仅能节省操作者在SA中查找命令的耗时，还可避免不同操作者因采用不同测量路径或操作不规范产生的测量误差，同时能规避操作者因操作不熟练导致的测量效率低下问题。

5 实验验证

开展自动化测量验证实验，验证本文所构建的基于激光跟踪扫描仪和SA软件二次开发所集成系统的有效性与实用性，实验布置现场如图19所示。

需要说明的是，本次实验所涉及的曲面部件尺寸较大(高度超过4 m)，若对全部定位点进行完整测量不太现实；同时，实验的核心目标是验证测量流程的自动化能力，而非全面评估曲面的精度合格性。因此，仅选取位于曲面下方的个别定位点进行测量，这些点位分布均匀且易于设备定位，既能满足自动化流程验证的需求，又能为后续曲面扫描提供可靠的参考基准。

实验过程中，完全依托本系统的核心功能模块推进：从设备连接、理论数模导入，到定位点与扫描区域的自动测量与扫描，再到坐标系拟合与点云数据-表面模型关系匹配，均按系统预设流程自动化执行。曲面定位点及曲面扫描结果如图20所示，系统完整捕捉了曲面的几何特征，还通过点



图 19 实验布置现场

Fig.19 Experimental layout site

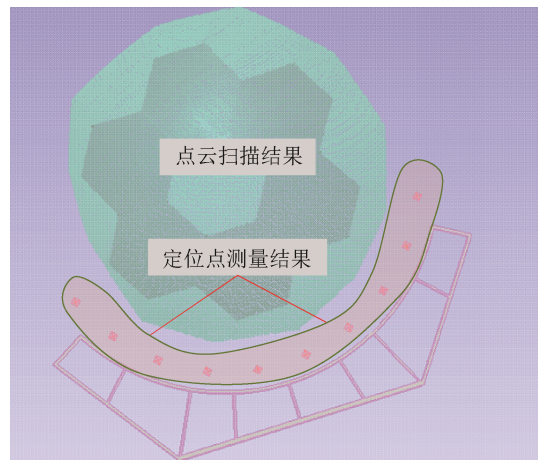


图 20 曲面定位点及曲面扫描结果

Fig.20 Curved surface positioning points and scanning results

云密度与分布均匀性体现了系统的扫描稳定性。

为验证本文开发系统的效率，开展传统测量与自动测量的对照实验，共测量4次并记录每次测量所占用的时间，利用式(7)计算提升效率 η ，并将结果填入表2。

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \quad (7)$$

式中： t_1 为传统测量时间， t_2 为自动测量时间。

由表2可知：传统测量方法用时波动较大，且均超过40 min；自动测量方法用时稳定性更优，且

表2 测量时间表

Tab.2 Measurement time

序号	传统测量方法 用时/min	自动测量方法 用时/min	$\eta/\%$
1	45	32	29
2	42	31	26
3	46	30	35
4	48	31	35

效率显著提升,证明本文提出的自动测量方法具备良好的可靠性。

为验证本系统的准确性,定位扫描测量并获得数据后,分别利用传统人工方式和本系统处理数据,按相同流程计算曲面形貌的Mag值,即实测点云数据与理论表面数模之间偏差的幅值(或大小),其采用式(8)计算误差百分比 η_0 ,将结果填入表3。

$$\eta_0 = \frac{e_1 - e_2}{e_1} \quad (8)$$

式中: e_1 为传统计算误差, e_2 为系统计算误差。

表3 曲面扫描结果准确性表

Tab.3 Accuracy of curved surface scanning results

数据处理 方式	最大值/ mm	最小值/ mm	平均值/ mm	均方根/ mm
人工	0.09	-0.7	-0.3	0.4
本系统	0.09	-0.7	-0.3	0.4
$\eta_0/\%$	0	0	0	0

由表3可知:当其他条件相同时,使用本系统得出的结果和使用传统方法得出的结果完全相同,这表明本套系统可以代替传统的人工模式,为曲面部件的自动化测试提供基础。

6 结论

本研究团队依托激光跟踪扫描仪兼具定点测量与曲面扫描的技术特性,以SA软件为开发平台构建了一套面向曲面的自动定位与扫描系统,并以大型曲面部件为例进行实验。结果表明:

1) 测量流程的自动化大幅提升了大型曲面形貌检测的效率,提升百分比约30%,并且测量稳定性大幅提高;

2) 程序流程的标准化最大限度消除了因操作

人员技能差异、操作习惯不同导致的随机性测量偏差,使检测数据的一致性与可靠性得到有效保障;

3) 其他条件不变时,系统计算结果与传统手工计算结果完全一致,既证明了本文开发系统的准确性,也说明其可完全替代传统人工操作模式。

本文的研究成果不仅为大型航空公司批量高效检测曲面的几何量参数提供了可直接参考的技术方案与实践范式,还为SA软件的二次开发与应用提供了重要借鉴。

参考文献

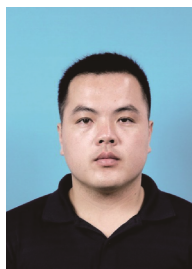
- [1] 李艺达,隋少春,曾坤,等.特征自适应的飞机大型蒙皮曲面测量系统与测量规划[J].南京航空航天大学学报,2022,54(3):428-438.
LI Y D, SUI S C, ZENG K, et al. Feature adaptive measurement system and measurement planning for large aircraft skin surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 428-438. (in Chinese)
- [2] 于连栋,张炜,罗辉,等.基于条纹投影的复杂曲面测量技术[J].计测技术,2018,38(3):82-90.
YU L D, ZHANG W, LUO H, et al. Complex surface measurement technology based on fringe projection [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38 (3) : 82-90. (in Chinese)
- [3] 李五朋,田锡天,耿俊浩,等.飞机大部件装配外形数字化组合测量方法[J].航空制造技术,2018,61(8):80-84.
LI W P, TIAN X T, GENG J H, et al. Digital combined measurement method for assembly shape of aircraft large parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(8): 80-84. (in Chinese)
- [4] 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,2014,54(13):52-55.
LI X. Application of digital measurement technology in aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 54(13): 52-55. (in Chinese)
- [5] 王素晓,王筱,田帅,等.飞机装配中的数字化仿真测量方法[J].装备制造技术,2016(5):89-92.
WANG S X, WANG X, TIAN S, et al. Digital simulation measurement method in aircraft assembly [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(5): 89-92. (in Chinese)
- [6] 汪俊,李红卫.飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2020,52(3):353-362.
WANG J, LI H W. Aircraft large-scale automation flexible measurement technology [J]. Journal of Nanjing Uni-

- versity of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 353-362. (in Chinese)
- [7] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology — review and future trends [J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [8] 王增坤, 杨志勃, 乔百杰, 等. 转子叶片叶端定时测振的频域分析研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 104-118.
- WANG Z K, YANG Z B, QIAO B J, et al. Summary of frequency domain analysis and research on rotor blade tip timing vibration measurement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 104-118. (in Chinese)
- [9] ELKOTT D F, VELDHUIS S C. CAD-based sampling for CMM inspection of models with sculptured features [J]. Engineering with Computers, 2007, 23(3): 187-206.
- [10] SONG C K, KIM S W. Reverse engineering: autonomous digitization of free-formed surfaces on a CNC coordinate measuring machine [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(7): 1041-1051.
- [11] PAHK H J, AHN W J. Precision Inspection system for aircraft parts having very thin features based on CAD/CAI integration [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12(6): 442-449.
- [12] 肖婧. 基于SA二次开发的大部件外形自动化测量[J]. 机械工程与自动化, 2024(3): 59-61.
- XIAO J. Automated measurement of large component appearance based on SA secondary development [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2024(3): 59-61. (in Chinese)
- [13] 刘盼, 史建华, 李昕愉, 等. 发动机叶片型面测量坐标系建立方法研究[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(1): 71-74.
- LIU P, SHI J H, LI X Y, et al. Study on the method of establishing coordinate system for measuring engine blade profile [J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(1): 71-74. (in Chinese)
- [14] 张双双. 基于逆向扫描技术蒙皮曲面装配偏差分析[J]. 科技创新与应用, 2017(26): 19.
- ZHANG S S. Analysis of assembly deviation of skin surface based on reverse scanning technology [J]. Technology Innovation and Application, 2017(26): 19. (in Chinese)
- [15] 张泽. 飞机蒙皮外形结构光扫描测量关键技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- ZHANG Z. Research on the key technology of shape structure light scanning measurement for aircraft skin shape [D]. Chengdu: Sichuan University, 2021. (in Chinese)
- [16] SHI J L, SUN Z X, BAIS Q. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser range-finder [J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2814-2823.
- [17] JIANG T, CHENG X, CUI H, et al. Combined shape measurement based on locating and tracking of an optical scanner [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(1): P01006.
- [18] 张俐, 任远鑫, 江春, 等. 基于SA二次开发的大尺寸型面数字化测量系统[J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 133-137.
- ZHANG L, REN Y X, JIANG C, et al. Digital measurement system of large-size profile based on secondary development of SA [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 133-137. (in Chinese)
- [19] 侯尚, 翟建军, 黄翔, 等. 基于激光雷达的飞机外形检测路径规划研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(2): 106-108.
- HOU S, ZHAI J J, HUANG X, et al. Research on path planning of aircraft shape detection based on lidar [J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(2): 106-108. (in Chinese)
- [20] 杨宝旒, 俞慈君, 金涨军, 等. 激光跟踪仪转站热变形误差建模与补偿方法[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3155-3164.
- YANG B L, YU C J, JIN Z J, et al. Modeling and compensation method of thermal deformation error of laser tracker transfer station [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3155-3164. (in Chinese)
- [21] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698-700.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 李严(1995—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为飞机装配数字化测量、工业软件开发。



通信作者: 张伟(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为几何量数字化测量方法、球坐标测量仪器研制。