基于双目视觉的飞机狭小空间橡胶环压缩量测量系统及方法

王浩浩[1] 徐纳川[2] 张 苗[1] 黄建才[2*] 刘行健[2]
1.中航西安飞机工业集团股份有限公司,西安,710089
2.大连理工大学机器人与智能系统研究院,大连,116023

摘要:针对飞机反推力装置装配过程中橡胶环压缩位移量测不到、测不准的难题,基于橡胶环待测空间环境特征分析,设计了一套适用于飞机狭小空间的双目视觉测量系统及装置。该测量系统集成双目相机、可移动卡槽、驱动舵机及光源等模块,能够灵活部署在狭小待测区域,实现橡胶环压缩过程的全域图像采集。结合高精度相机标定技术与低光照图像增强算法,建立了像素位移与实际物理位移之间的精确映射关系,并显著提高了暗环境下的图像质量与测量可靠性。在橡胶环边缘布设特征标志点,通过多标志点匹配与位移量求解算法获得了橡胶环的全域压缩位移量。基于橡胶环仿形装置进行精度验证试验,结果表明,所发展的双目视觉测量系统能够在狭小空间内实现高精度测量,平均测量误差为0.05 mm。通过装配现场实际应用验证,为反推力装置装配质量评估提供了测量数据支撑。

关键词:飞机装配;狭小空间;双目相机;非接触式测量;橡胶环压缩位移量
中图分类号:TP182
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.030 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Measurement System and Method for Rubber Ring Compression in Narrow Aircraft Spaces Based on Binocular Vision

WANG Haohao[1] XU Nachuan[2] ZHANG Miao[1] HUANG Jiancai[2*] LIU Xingjian[2]
1.AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an, 710089
2.School of Institute of Robotics and Intelligent Systems, Dalian University of Technology, Dalian, Liaonning, 116023

Abstract: To address insufficient and inaccurate measurement of rubber ring compression displacement in the assembly processes of aircraft thrust reverser, a set of binocular vision measurement system and device suitable for narrow aircraft spaces were designed based on the analysis of the environmental characteristics in the space to be tested for rubber rings. The measurement system integrates modules such as binocular camera, movable slot, driving steering gear and light source, which can be flexibly deployed in a narrow testing area to realize the global image acquisition of the rubber ring compression processes. Combining high-precision camera calibration technology and low-light image enhancement algorithm, an accurate mapping relationship between pixel displacement and actual physical displacement was established, which significantly improves image quality and measurement reliability in dark environment. The feature mark points were laid on the edge of the rubber ring, and the global compression displacement of the rubber ring was obtained by multi-mark point matching and displacement solution algorithm. The accuracy verification tests were carried out based on the rubber ring profiling device. The results show that the developed binocular vision measurement system may achieve high-precision measurement in a narrow space, and the average measurement error is 0.05 mm. Through the practical application verification of the assembly site, it provides a measurement data support for the assembly quality evaluation of the thrust reverser.

Key words: aircraft assembly; narrow space; binocular camera; non-contact measurement; rubber ring compression displacement

0 引言

飞机装配技术作为现代航空制造领域中的关键技术,直接决定了飞机的性能指标及生产制造成本。在飞机总装过程中,大部件对接是核心工艺环节,其装配质量和效率对整机生产节拍及交付周期具有显著影响[1]。飞机装配以工序为基本单元,总装脉动生产线各站位的装配工序呈现强耦合特征,若某一装配工序出现瓶颈,则不仅会延

收稿日期:2026-01-24
基金项目:国家自然科学基金(62403498,62533003);辽宁省自然科学基金计划博士科研启动项目(2025-BS-0017)

长该站位的转站周期，还将影响下游工序的正常推进与交付。随着主机厂飞机型号谱系的持续扩展，批产与新研任务日趋繁重，亟需识别并优化影响交付周期的关键装配工序；在确保装配质量的前提下，提高装配效率对压缩飞机全流程交付周期、增强制造体系的快速响应能力具有重要意义。

随着数字化测量技术与预装配仿真技术的日益成熟，飞机大部件对接已逐步由传统的“试装＋修配”模式向以测量辅助为核心的“数字化装配”模式转变[2-4]。在装配工序实施之前，通过获取装配协调区域的实际测量数据，可提前识别大部件的对接偏差与装配协调量，从而为后续高精度、高效率的装配作业提供重要数据支撑，可有效避免装配工序的反复执行。郭飞燕等[5]系统梳理了面向性能保障的新一代飞机结构装配质量控制技术，其中重点阐述了数字化测量技术应用对保障飞机高性能装配的重要性。罗枭等[6]整合了数字化装配中的测量特征、测量基准、测量方法等内容，提出了飞机制造过程三维测量模型构建与数据管理方法，为高效率、高质量装配提供了底层测量数据支撑。刘春等[7]面向飞机大部件自动化和数字化对接装配应用场景，提出并实施了一种飞机大部件对接装配数字孪生系统，有效解决了数据缺乏互联互通、数据处于信息孤岛等问题。

作为飞机装配过程中的关键前置环节，数字化测量技术已在装配环境相对开敞的场景下得到广泛应用[8-12]。然而，在飞机实际装配现场，针对机身内部的复杂装配对接作业，由于机体结构密集、空间受限，且存在大量系统、管路的相互遮挡，造成现有数字化测量手段难以灵活部署和有效实施，导致某些关键部位的装配对接仍主要依赖人工试装与经验性调整，影响装配质量的一致性与稳定性。为此，亟需研发适用于狭小、复杂空间环境的测量系统，并实现它与大部件装配工序的深度融合与协同作业，确保在不干扰正常装配流程的前提下，高效、精准地完成关键装配特征的测量需求，从而为装配质量评估提供测量数据支撑。

本文针对某型批产飞机在总装阶段存在的关键堵点问题，聚焦发动机反推力装置与机翼吊挂管路装配对接过程中测量可达性差、效率低下、装配质量难以保证等技术瓶颈，研发了一套适用于狭小空间的双目视觉测量系统。该测量系统具备体积小、可灵活调节等特征，能够实时监测反推力装置橡胶环压缩对接过程，实现装配过程中关键位移量的高精度测量，有效解决了传统装配工艺中装配质量难以评估、测量精度不足、装配工序繁琐等问题，为大型飞机快速研制与混型批量生产的快速交付提供了坚实的技术支撑。

1 橡胶环压缩位移量测量需求分析

某型国产大型飞机机翼吊挂、发动机、反推力装置在进行装配对接时，机翼吊挂上预冷器调节活门与反推力装置外部引气管路之间设置有可压缩橡胶环。当反推力装置两侧风扇罩扣合时，预冷器调节活门与外部引气管路端口接触并挤压可压缩橡胶环，从而实现装配对接。

为精确调控外部空气的引气流量，实现机身内部环境温度的调节与控制，要求在装配对接的过程中精准测量可压缩橡胶环的压缩位移量，以监测预冷器调节活门与外部引气管路是否达到理想接触状态。反推力装置引气管路端口装配对接区域如图1所示，其中可压缩橡胶环为椭圆形，长轴尺寸为190 mm，短轴尺寸为130 mm，引气管路长度约为420 mm。

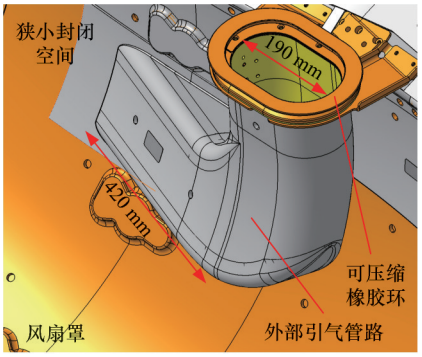


图1 反推力装置橡胶环结构

Fig.1 Rubber ring structure of reverse thrust device

在常规大部件装配对接工序中，通常遵循先安装发动机、后安装反推力装置的装配工艺流程。在此装配工艺路径下，可压缩橡胶环处于机身半封闭空间内，导致人工不可视、测量不可达，无法实现对橡胶环压缩量的直接测量。为解决橡胶环压缩量的测量问题，当前装配工序为：在机翼吊挂安装完成后先安装反推力装置，此时发动机尚未安装，引气管路对接端口处于开放状态，具备可视与可测条件。在此阶段下采用游标卡尺分别测量橡胶环的初始状态与压缩后状态，从而获取其压缩量数据。采集到橡胶环压缩量的测量数据后，需对反推力装置进行分解与拆卸，最终完成装配对接。整体装配工序如图2所示。

现阶段，橡胶环压缩位移量的测量主要存在如下问题：

1）装配工序繁琐。发动机位于反推力装置中心位置，反推力装置安装后无操作空间再安装发

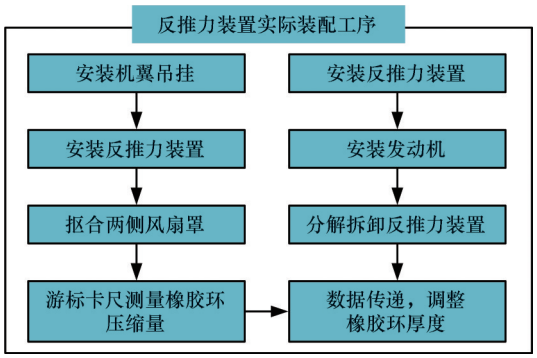


图2　反推力装置的实际装配工序

Fig.2　Actual assembly process of the reverse thrust device

动机，因此，当前橡胶环压缩量测量方法额外增加反推力装置分解、拆卸和恢复安装的工作量，对该站位飞机的转站周期造成严重影响。

2）测量精度不高。现阶段橡胶环压缩量的测量仅能在反推力装置单独安装状态下进行，未考虑发动机安装后的自重影响，测量精度不足。

3）测量点位不足。受限于待测区域的结构遮挡，游标卡尺无法对椭圆形橡胶环全域压缩量进行测量，存在测量点位不足的问题。

为保证反推力装置关键对接区的装配质量，当前亟须研发适用于橡胶环所处空间环境特征的测量系统及方法。

2　基于双目视觉的测量系统结构及功能设计

待测区域空间环境特征及测量需求如下：

1）空间尺寸约束。橡胶环处于机身内部管路对接区域，其空间极度狭小，待测区域的面积约为190 mm×130 mm。

2）部署环境限制。反推力装置两侧风扇罩扣合后橡胶环处于半封闭空间，常规测量设备部署困难。

3）非接触测量需求。测量过程中应尽量避免与飞机部件直接接触，防止测量装置因被挤压损坏而在机身内部产生多余物。

4）测量精度与范围。为准确评估反推力装置装配对接质量，设计技术指标要求橡胶环压缩量测量精度达到0.5 mm，测量范围覆盖橡胶环全周。

结合橡胶环待测区域的测量环境特征及需求，本文针对性地研发了适用于狭小管路空间的双目视觉测量系统，整体结构组成如图3所示。

为适配狭小空间部署要求，测量装置的轮廓尺寸设计为180 mm×65 mm×70 mm，并布置可移动卡槽，长度方向调节范围为0～16 mm，能够根据飞机管路内壁尺寸灵活调整，以确保测量装置贴合管路内壁。

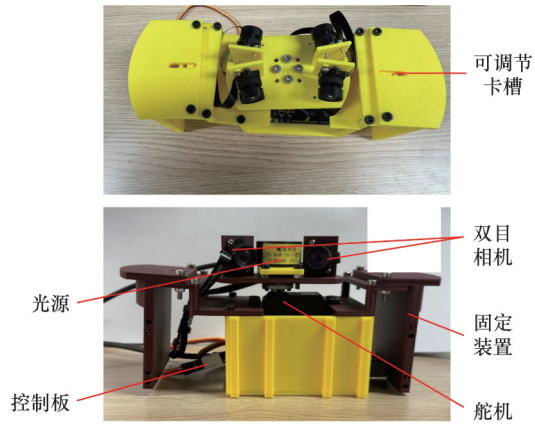


图3　双目视觉测量装置及系统

Fig.3　Binocular vision measurement device and system

为实现非接触式和全域测量需求，搭建双目视觉测量系统。在测量装置内部集成两对双目相机，单个相机尺寸为14 mm×14 mm×14.8 mm，以适应待测区域的“狭长”特征。为实现橡胶环的全周压缩量测量，设计驱动舵机模块，通过法兰与双目相机连接，以实现30°、60°、90°、120°及150°的多角度精确调整，从而可全方位采集橡胶环不同位置处的压缩过程图像。

此外，考虑到机身内部封闭、光照条件差等问题，设计配套光源模块，采用0～24 V/1 A可调直流电源供电，可根据实际测量环境调节光照强度，为图像采集提供基础光照条件。

3　橡胶环压缩位移量测量算法

为实现对反推装置中橡胶环压缩量的高精度测量，本文构建了一套基于双目视觉的测量算法框架。该框架主要由如下三个模块构成：双目相机标定、低照度图像增强处理以及多标志点的跟踪匹配与位移分析。

3.1　双目相机标定

为建立三维空间点与图像平面上的像素坐标之间的准确映射关系，消除相机成像过程中引入的几何畸变与系统误差，需要对双目相机系统进行精确标定。利用棋盘格对双目相机进行标定，其原理是通过世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系之间的转换获得相机的内外参数矩阵，具体转换关系如图4所示。

从世界坐标系到像素坐标系的映射关系为

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{d_x}&0&c_x\\0&\frac{1}{d_y}&c_y\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f&0&0&0\\0&f&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}&\boldsymbol{T}\\\boldsymbol{0}&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}\quad(1)$$

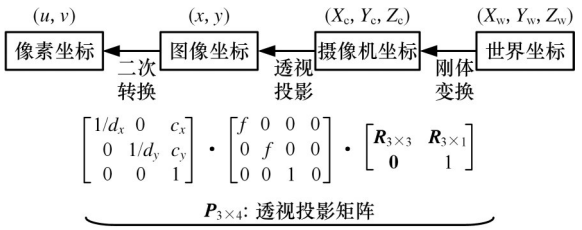


图4 坐标转换关系

Fig.4 Relation of coordinate transformation

将矩阵表达式进行整理可进一步得到

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：f为相机焦距；Z_c为某点在相机坐标系下的深度坐标值；(X_w, Y_w, Z_w)、(u, v)分别为某点在世界坐标系和像素坐标系下的坐标值；$\boldsymbol{K}$为3×3相机内参矩阵；$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{T}$分别为3×3旋转矩阵和3×1平移向量，两者共同描述世界坐标系到相机坐标系的刚体变换；c_x、c_y分别为主点的横、纵像素坐标；d_x、d_y为两个方向的像素间距，与f采用相同长度单位，其倒数为物理长度到像素数的转换系数。

采用张正友标定法确定双目相机的标定参数，以棋盘格平面靶标为基础，通过精确获取棋盘格内角点在图像平面中的像素坐标，并结合其在世界坐标系中的已知位置，实现图像坐标与世界坐标之间的映射关系，从而求解相机的内外参数。由此可知，角点检测的鲁棒性与精度决定了标定参数求解的可靠性。为获取到精确的角点在图像平面中的像素坐标，采用一种基于灰度变化与结构约束相结合的棋盘格角点自动检测算法。在角点初始检测阶段，利用棋盘格黑白区域在灰度空间中呈现出的强对比与方向无关的变化特性，通过分析图像灰度函数$I(u,v)$在局部邻域内的变化情况，以此构建候选角点集合。棋盘角点处在水平与垂直两个方向上均表现出显著的灰度变化，其局部灰度分布由梯度向量可表示为

$$\nabla I(u,v)=\left(\frac{\partial I}{\partial u},\frac{\partial I}{\partial v}\right)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：$I(u,v)$表示图像在像素坐标(u,v)处的灰度值；$\frac{\partial I}{\partial u}$、$\frac{\partial I}{\partial v}$分别为图像灰度值在$u$和$v$方向的变化率。

通过对梯度幅值与方向一致性的综合判别，抑制仅在单一方向上变化的边缘响应，从而提高角点候选检测的区分度。由于棋盘格内角点在图像中构成规则的二维网格，其行列数已知、相邻角点间距近似恒定且拓扑关系稳定，本文利用上述约束剔除由噪声或局部纹理引入的伪角点，并对真实角点进行自动排序，获得角点的初始像素坐标。为进一步提高角点定位精度，在初始检测结果的基础上，对每个角点在局部邻域内进行亚像素级优化。通过最小化灰度一致性误差函数能够有效减小像素量化误差对标定结果的影响，从而提高张正友标定法中内外参数估计的精度与稳定性。最小化灰度一致性误差函数可表示为

$$E(\boldsymbol{p})=\sum_{(u,v)\in\Omega}w(u,v)(I(u+p_u,v+p_v)-I(u,v))^2 \tag{4}$$

式中：Ω为初始角点附近局部搜索窗口内的像素坐标集合；$\boldsymbol{p}$为角点像素位置的二维微小修正向量，其分量为p_u和p_v；$w(u,v)$表示窗口内像素的权重函数。

本文在多个角度采集标定板图像，将检测到的特征点坐标精确到亚像素级别，从而得到双目相机的内外参数。双目相机标定所用的棋盘格如图5所示。

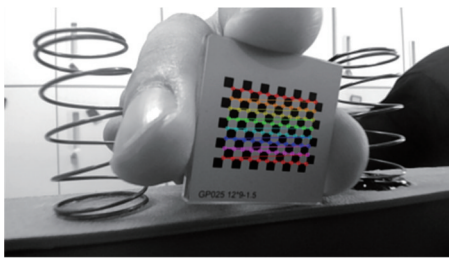


图5 双目相机标定棋盘格

Fig.5 The checkerboard of binocular camera calibration

3.2 低照度图像质量增强

由于反推力装置引气管路装配对接处于机身内部，因此待测区域会因结构遮挡和光源不均而出现亮度剧烈变化。为提高图像采集质量，本文通过多尺度高斯模糊融合处理算法，利用多个具有不同标准差的高斯滤波器对同一幅图像进行平滑处理，从而在不同空间尺度上提取图像的结构信息。高斯滤波可表示为

$$G(\xi,\eta)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{\xi^2+\eta^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

式中：$G(\xi,\eta)$表示二维高斯函数；(ξ,η)为像素点相对于滤波窗口中心的空间坐标；σ为高斯核的标准差，单位为像素。

通过与原始图像$I(u,v)$进行卷积运算，得到不同尺度i下的模糊结果，其表达式如下：

$$I_i(u,v)=I(u,v)*G_i(u,v) \tag{6}$$

其中，G_i为第i个尺度的高斯核。较大的σ值能够有效平滑剧烈的亮度起伏，削弱局部强反射与阴影的影响，突出整体光照分布趋势；较小的σ值则可以在一定程度上保留橡胶环标志点边缘及其周围的局部纹理特征。

为获得在全局亮度均衡性与局部结构保真度之间取得平衡的融合图像，对不同尺度i下得到的模糊图像按照预设权重进行线性融合，其表达式如下：

$$I_f(u,v)=\sum_{i=1}^{N} w_i I_i(u,v) \tag{7}$$

式中：N为滤波尺度的数量；w_i为第i个尺度下对应的权重，且各权重之和为1(即$\sum_{i=1}^{N} w_i=1$)。

3.3　橡胶环压缩位移量计算

完成图像低照度增强后，在橡胶环内侧边缘处均匀布置圆形标志点，通过多个标志点的位移量来表征橡胶环的实际压缩量。本文利用Canny边缘检测算子[13]对采集到的图像进行处理，提取其中具有显著梯度变化的边缘信息，从而得到包含轮廓像素的二值化图像。

首先，对输入图像$I_f(u,v)$计算水平方向与垂直方向的灰度梯度，其表达式如下：

$$G_u=\frac{\partial I_f}{\partial u}\qquad G_v=\frac{\partial I_f}{\partial v} \tag{8}$$

并由此得到梯度幅值与方向，其表达式如下：

$$\left.\begin{aligned} G&=\sqrt{G_u^2+G_v^2}\\ \theta&=\arctan\frac{G_v}{G_u}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中，G为梯度幅值；θ为梯度方向角，表示灰度增长最快的方向与图像u轴正方向的夹角。通过非极大值抑制对梯度幅值进行细化，仅保留沿梯度方向上的局部极大值点，从而将宽边缘压缩为单像素宽度的候选边缘。为进一步提高边缘的连续性与抗噪性能，引入双阈值滞后机制，设置高阈值T_h与低阈值T_l，判定条件如下：

$$G\geqslant T_h \tag{10}$$

$$T_l\leqslant G<T_h \tag{11}$$

其中，将满足式(10)的像素判定为强边缘，将满足式(11)且与强边缘连通的像素判定为弱边缘，其余像素则被抑制。

本文根据梯度幅值G的统计分布确定阈值，设80%分位为高阈值，采用固定比例关系得到低阈值。通过上述处理则可获得仅包含标志点显著轮廓信息的二值化边缘图像。

为获得椭圆形橡胶环的全域压缩量，基于最小二乘法对采集图像的每个轮廓点序列进行橡胶环椭圆外形拟合，通过对轮廓点集的整体误差进行优化求解，可以获得椭圆的中心位置、长短轴半径等关键几何参数。最小二乘椭圆拟合对缺失的部分边缘和局部噪声具有较强的容错能力，能够在弱纹理或光照干扰的情况下仍得到稳定、合理的椭圆外形。

对图像中检测出的标志点圆心进行左右图像匹配，对于左右图中的标志点圆心，将其按照u坐标从小到大排序(坐标原点位于图像左下角)，其中左图记为$\{(u_{11},v_{11}),(u_{12},v_{12}),\cdots,(u_{1n},v_{1n})\}$，右图记为$\{(u_{21},v_{21}),(u_{22},v_{22}),\cdots,(u_{2m},v_{2m})\}$。其中，$n$、$m$分别为左右图像中检测到的标志点数量。分别选取左右图中u坐标值最小的标志点圆心，比较两个标志点圆心的v值，确保v值相差在5个像素值之内，即表明两个标志点圆心处于同一极线上。按照上述方法依次进行匹配，直至完成左右图像中所有标志点圆心的一一对应，并根据匹配顺序对各标志点进行统一编号。

将标志点配对完成后，可利用棋盘格标定得到的相机内外参数矩阵对每一对标志点进行三维重建与位移计算。在压缩前后分别得到同一编号标志点k的三维坐标$\boldsymbol{P}_k^{(0)}=(X_k^{(0)},Y_k^{(0)},Z_k^{(0)})$与$\boldsymbol{P}_k^{(1)}=(X_k^{(1)},Y_k^{(1)},Z_k^{(1)})$，则该标志点的三维位移向量为

$$\Delta\boldsymbol{P}_k=\boldsymbol{P}_k^{(1)}-\boldsymbol{P}_k^{(0)}=(X_k^{(1)}-X_k^{(0)},Y_k^{(1)}-Y_k^{(0)},Z_k^{(1)}-Z_k^{(0)})^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

由此可获得位移模长为

$$\|\Delta\boldsymbol{P}_k\|=\sqrt{(X_k^{(1)}-X_k^{(0)})^2+(Y_k^{(1)}-Y_k^{(0)})^2+(Z_k^{(1)}-Z_k^{(0)})^2} \tag{13}$$

3.4　测量系统精度验证试验

为验证双目视觉测量系统的测量精度，基于总装现场实际装配环境模拟橡胶环的压缩过程，并搭建图6所示的测量平台。该模拟装置内部布置有弹簧，通过对弹簧施加压力来模拟橡胶环的压缩过程，通过布设黑暗环境来模拟机身内部低光照环境。采用游标卡尺测量橡胶环在压缩前后的位移量，将其作为测量参考值，测量结果如图7所示。然后，采用双目视觉测量系统对橡胶环仿形装置的压缩量进行测量，并将测量结果与参考结果进行对比。

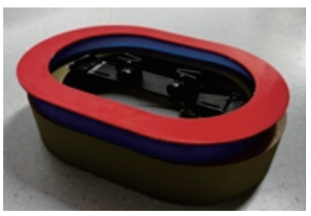
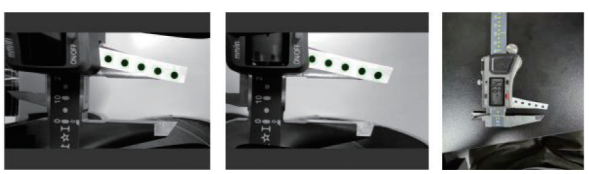


图6　橡胶环压缩过程模拟装置

Fig.6　Simulation device of rubber ring compression process



(a)压缩前　(b)压缩后　(c)测量结果

图7　游标卡尺测量结果

Fig.7　Measurement results of vernier calipers

为充分验证测量精度，共进行了13次重复试验，压缩量范围为7～24 mm，游标卡尺与双目视觉测量系统的结果对比如表1所示。试验结果表明，双目视觉测量系统的绝对测量误差小于0.2 mm，平均测量误差为0.05 mm，能够达到橡胶环压缩量的高精度测量需求。

表1 测量结果对比

Tab.1 Comparison of measurement results

序号	参考结果/mm	系统测量/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	7.32	7.37	0.05	0.68
2	8.43	8.49	0.06	0.71
3	8.49	8.45	0.04	0.47
4	8.84	8.80	0.04	0.45
5	9.34	9.37	0.03	0.32
6	10.20	10.19	0.01	0.10
7	11.33	11.27	0.06	0.53
8	12.52	12.50	0.02	0.16
9	12.68	12.64	0.04	0.31
10	13.64	13.60	0.04	0.29
11	17.20	17.32	0.12	0.70
12	20.74	20.73	0.01	0.05
13	24.28	24.45	0.17	0.70

4 双目视觉测量系统实际应用

图8展示了基于双目视觉测量系统的橡胶环压缩位移量测量流程。测量主要步骤如下：

1)测量系统的布置与安装。打开反推力装置两侧风扇罩，使吊挂管路与反推力装置引气管路接口处于分离状态，此时将图像采集装置固定于反推力装置引气管路内壁，从而确保双目相机对准橡胶环中心，具体如图9所示。

2)粘贴特征标志点。在橡胶环边缘处均匀粘贴直径为3 mm的圆形标志点。

3)双目相机的标定。采用高精度陶瓷棋盘格标定板求解双目相机的内外参数矩阵。

4)图像质量增强。采用基于多尺度高斯模糊融合处理算法来提高标志点与背景之间的对比度，以增强其可检测性。

5)全域测量数据采集。驱动舵机分别实现30°、60°、90°、120°和150°的旋转，使双目相机采集各角度下标志点的初始位置图像，随后返回预设初始位置。当橡胶环压缩后，重复上述步骤，驱动双目相机在多个预设角度下实时监测橡胶环的压缩过程。

6)标志点匹配跟踪。对双目相机同步采集的左右图像完成图像配对后，利用双目相机标定得到的内外参数，计算出每个标志点的空间坐标。

7)压缩量求解。通过计算每一帧中各点位移的差值，得到各点的局部压缩量。对拍摄所得的多个特征点进行空间坐标计算，从而获得全域压缩量。

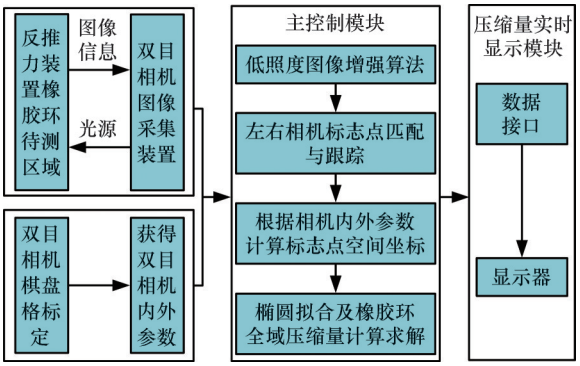


图8 反推力装置橡胶环压缩量测量过程

Fig.8 Measurement process of rubber ring compression of reverse thrust device

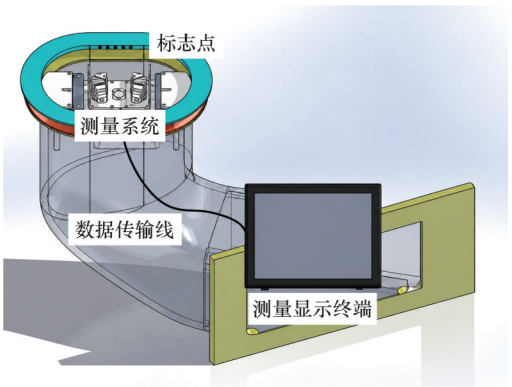


图9 橡胶环压缩量测量示意图

Fig.9 Measurement diagram of rubber ring compression

通过自主设计的双目视觉测量系统在飞机狭小空间内实现了橡胶环压缩位移量的全域、高精度测量，可为反推力装置装配质量评估提供技术支撑。

5 结论

针对飞机反推力装置装配对接过程中橡胶环压缩量所面临的测量可达性差、测量精度不足、测量点少等问题，自主设计并搭建了适用于飞机狭小空间的双目视觉测量系统，主要研究结论如下：

1)基于橡胶环待测空间环境特征及测量需求分析，完成了面向飞机狭小空间的双目视觉测量系统总体设计。通过集成双目相机、驱动舵机、光源等模块，实现了在狭小空间内对橡胶环压缩过程的全域图像采集。

2)融合高精度相机标定技术与低光照图像增强算法，构建了像素位移与实际物理位移之间的精确映射关系。采用多标志点跟踪匹配与位移

量求解算法，实现了橡胶环全域压缩量的计算。

3)通过橡胶环仿形装置，对所搭建的双目视觉测量系统进行精度验证试验。验证结果表明，平均测量误差为0.05 mm，充分验证了该测量系统的测量精度。

参考文献：

[1] 朱永国. 飞机大部件自动对接若干关键技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2012.
ZHU Yongguo. Research on Some Key Techniques on Aircraft Large Part Automatic Joining[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2012.

[2] 赵欢，葛东升，罗来臻，等. 大型构件自动化柔性对接装配技术综述[J]. 机械工程学报，2023，59(14)：277-297.
ZHAO Huan，GE Dongsheng，LUO Laizhen，et al. Survey of Automated Flexible Docking Assembly Technology for Large-scale Components[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(14)：277-297.

[3] 张开富. 飞机装配过程数字化测量技术[J]. 航空制造技术，2016，59(10)：34-40.
ZHANG Kaifu. Digital Measuring Technique in Aircraft Assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2016，59(10)：34-40.

[4] 张微. 基于实测数据的飞机部件数字化预装配技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2016.
ZHANG Wei. Research on Aircraft Components Digital Preassembly Based on Measured Data[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2016.

[5] 郭飞燕，刘检华，邹方，等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报，2019，55(17)：110-132.
GUO Feiyan，LIU Jianhua，ZOU Fang，et al. Research on the State-of-art，Connotation and Key Implementation Technology of Assembly Process Planning with Digital Twin[J]. Journal of Mechanical Engineering，2019，55(17)：110-132.

[6] 罗枭，杨亚鹏，赵安安，等. 飞机制造过程三维测量模型构建与数据管理技术研究[J]. 航空制造技术，2025，68(12)：121-133.
LUO Xiao，YANG Yapeng，ZHAO An'an，et al. Research on 3D Measurement Model Construction and Data Management Technology of Aircraft Manufacturing Process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2025，68(12)：121-133.

[7] 刘春，陈宇，杨冬，等. 飞机大部件对接系统数字孪生技术应用研究[J]. 航空制造技术，2025，68(1)：130-136.
LIU Chun，CHEN Yu，YANG Dong，et al. Research on Application of Digital Twin Technology in Aircraft Large Component Alignment System[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2025，68(1)：130-136.

[8] 邢一新. 飞机装配几何量质量检测体系构建及关键技术[J]. 航空制造技术，2021，64(6)：24-31.
XING Yixin. Research on Establishment and Key Techniques of Aircraft Assembling Geometric Measurement System[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2021，64(6)：24-31.

[9] 杜坤鹏，郑炜，李泷杲，等. 基于实测模型的围框式翼身对接位姿优化[J]. 航空制造技术，2022，65(12)：24-33.
DU Kunpeng，ZHENG Wei，LI Shuanggao，et al. Posture Optimization of Framed Wing-body Docking Based on Measured Model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2022，65(12)：24-33.

[10] 马大智，于斌超，张彦泽，等. 基于双目视觉的大型高反光构件测量系统[J]. 应用光学，2021，42(4)：577.
MA Dazhi，YU Binchao，ZHANG Yanze，et al. Measurement System of Large-scale High Reflective Component Based on Binocular Vision[J]. Journal of Applied Optics，2021，42(4)：577.

[11] 杨永俊，杨仁友，李俞锋，等. 基于自主水下航行器搭载单目-线激光器的水下目标三维重建方法[J]. 中国机械工程，2026，37(5)：1210-1217.
YANG Yongjun，YANG Renyou，LI Yufeng，et al. Underwater Target 3D Reconstruction Method Based on AUV Equipped with Monocular-Line Laser[J]. China Mechanical Engieering，2026，37(5)：1210-1217.

[12] 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 Wupeng，TIAN Xitian，GENG Junhao，et al. Digital Combined Measuring Technology of Aircraft Large Components Outline[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2018，61(8)：80-84.

[13] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，1986，8(6)：679-698.

（编辑　胡佳慧）

作者简介：王浩浩，男，1995年生，博士、工程师。研究方向为双目视觉辅助的飞机装配技术。E-mail：wang2018. m@mail. nwpu. edu. cn。**黄建才***（通信作者），男，1995年生，博士、讲师。研究方向为机器视觉测量、智能机器人。E-mail：huangjiancai@dlut. edu. cn。

本文引用格式：

王浩浩，徐纳川，张苗，等. 基于双目视觉的飞机狭小空间橡胶环压缩量测量系统及方法[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2971-2977.

WANG Haohao，XU Nachuan，ZHANG Miao，et al. Measurement System and Method for Rubber Ring Compression in Narrow Aircraft Spaces Based on Binocular Vision[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(11)：2971-2977.