

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220967-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220967

航空发动机机匣三维动态位姿多目视觉测量

郭建英^{1,2}, 梁 晋¹, 叶美图¹, 王明明², 刘 辉¹, 滕光蓉²

(1. 西安交通大学 机械工程学院 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 强度传动试验研究室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对航空发动机机匣刚度试验中相对位姿难以测量的问题, 对常规双目视觉位姿测量方法进行了改进, 提出了基于定位编码点的全局多目动态位姿测量方法。利用近景摄影测量技术获取机匣定位编码点在初始坐标系下的全局坐标, 并通过矢量坐标转换方法转换至自定义的机匣数模坐标系下; 运用数模编码点坐标求解多目相机外参, 统一各测量相机坐标系, 从而能够在自定义坐标矢量上对测量数据进行分析; 通过多目动态位姿测量法获得机匣内外环测点在各变形状态下的三维坐标, 进而解算出机匣测点在数模坐标系下的位移和姿态及其相对变化信息。试验证明, 相对传统千分表测量方法, 该方法的位移测量误差小于 0.005 mm, 弥补了传统测量方法难以测量试验件的不同部位相对姿态的缺点, 为航空发动机机匣及相关壳体类的刚度试验提供了便捷的测量方法和可靠的数据来源。

关 键 词: 视觉测量; 航空发动机机匣; 摄影测量; 坐标转换; 相对位姿

中图分类号: V214.3⁺²

文献标志码: A

Multi-view visual measurement of three-dimensional dynamic position and orientation of aero engine casing

GUO Jianying^{1,2}, LIANG Jin¹, YE Meitu¹, WANG Mingming²,

LIU Hui¹, TENG Guangrong²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Laboratory for Strength and Transmission, Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In view of the difficulty of measuring the relative position and orientation in the rigidity test of aero engine casing, the conventional method of binocular visual measurement for position and orientation was improved, a global multi-view visual dynamic position and orientation measurement method based on video dynamic measurement technology was proposed. The global coordinates of coded point on the casing under initial coordinate system were obtained by close-range photogrammetry and converted to custom numerical model coordinate system of the casing by vector coordinate transformation. The external parameters of multi-view camera were solved by using the coded point coordinates under numerical model coordinate system, and the coordinate system of each measuring camera was unified, so that the measuring data can be analyzed in the customized coordinate vector. The three-dimensional coordinates of measuring points on the inner and outer rings of the casing under each deformation state were obtained by multi-view visual dynamic position and orientation measurement method, and then the position and orientation of the measuring points on the inner and outer rings of the casing in the numerical

收稿日期: 2022-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(52275543)

作者简介: 郭建英(1985—), 男, 博士生, 主要从事发动机强度试验技术研究。

引用格式: 郭建英, 梁晋, 叶美图, 等. 航空发动机机匣三维动态位姿多目视觉测量[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220967. GUO Jianying, LIANG Jin, YE Meitu, et al. Multi-view visual measurement of three-dimensional dynamic position and orientation of aero engine casing[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220967.

model coordinate system as well as their relative changes were calculated. The test results showed that the displacement measurement error of the proposed method was less than 0.005 mm compared with the traditional micrometer measurement method, which made up for the disadvantage of the traditional measurement method in extracting difficultly the relative orientation of different parts of the test piece, thus providing a convenient measurement method and reliable data source for the rigidity test of aero engine casing and related shells.

Keywords: visual measurement; aero engine casing; photogrammetry; coordinate transformation; relative position and orientation

航空发动机机匣是支撑转子、传递推力、构成燃气流道的关键部件,通常设计为内外环壳体结构,内环支撑转子,内环和外环之间形成燃气流道^[1]。为提高发动机的推质比,机匣壳体应在满足功能和强度的基础上设计得足够薄,但又必须有足够的刚度,使得支撑转子不会因大挠度变形而产生碰磨故障或者损坏轴承。因此,机匣研制过程中需在发动机模拟载荷下测量内环相对外环的位移和姿态变化。传统的千分表、激光位移传感器由于无法准确指定方位而难以实施位姿测量,比较先进的三坐标测量机很难在复杂的试验现场展开作业,使得机匣的相对位姿测量成为一项具有挑战性的任务。

多目视觉测量是以双目视觉测量技术为基础的全场变形测量方法,该方法最早由美国南卡罗来纳大学的 Luo 等^[2]提出,通过模拟人的双眼视觉原理,跟踪立体图像序列中的特征点坐标获得位移变化量,进而换算特征点、面的相对位移,具有非接触、全场、高精度测量等优点,已在材料力学性能测量^[3-6]、航空航天^[7-9]领域得到广泛运用。许多研究学者已经进行了工程结构的双目视觉位姿测量研究,其中,张淑平等^[10]针对六自由度平台位姿进行三维视觉测量,并在图像坐标系下获得单个特征平面位姿变化量。马瑾等^[11]基于三维视觉测量技术,通过中间位姿变化量叠加初始位姿获得了六自由度平台的相对位姿,但位姿测量仍在图像坐标系下计算,图像坐标系下的初始位姿测量给试验结果带来坐标转换误差。邸红采等^[12]提出用铣削机器人刀具主轴和固定夹具末端固定编码点的方法建立相对坐标系,通过双目视觉测量获得刀具相对加工件的位姿,但坐标系之间的转换关系通过多个已知位姿拟合求解的方法计算,已知位姿的自身误差对测量结果有较大影响。刘岩等^[13]以双目视觉测量单元的左相机坐标系为世界坐标系测量了空间物体的位姿,利

用空间物体的特征点建立拟合物体坐标系,为相对位姿测量坐标系建立提供了思路。上述双目视觉测量方法为机匣特定平面相对绝对坐标系的位姿测量提供了方法,而机匣的相对位姿测量需在指定模型坐标下测量特定平面相对指定平面的位姿变化,并排除测量系统自身的定位误差,且试验测量结果能够在机匣数模坐标系下计算分析两个特定平面相对的姿态变化,测量视场能够在计算图像分辨率内涵盖整个机匣测点。

为了解决上述问题,本文通过在机匣基准位置和测量位置分别构建特征坐标系,运用摄影测量方法得到测量相机单元的绝对外参数,并建立基准位置坐标系和测量位置坐标系之间的映射关系。最后用多组双目视觉测量单元获得特征编码点在特征坐标系下的相对坐标变化,进而换算不同测量平面的相对位姿,该方法能够有效避免传统仪表测量过程中由于仪表工装变形导致的刚体位移以及测量仪表难以准确安装定位的难题,改进了双目位姿测量的坐标转换方法,并通过试验验证了该方法的可行性和测量精度。

1 测量原理

本文提出的全局多目视觉测量方法结合了摄影测量坐标定位方法和视频动态测量技术。为获得被测机匣测量点的全部视场,使用两组双目测量单元,每组双目测量单元包含两台高分辨率的电荷耦合传感器(CCD)相机。测量过程中,在机匣上布设全局编码点,运用摄影测量方法获取编码点的全局三维坐标并建立全局坐标系。利用坐标转换方法将两组测量单元的坐标系对齐到全局坐标系下,从而统一视场测量坐标。全局多目视觉测量示意图如图 1 所示。

图 1 中,全局多目视觉测量系统由摄影测量系统及多套双目测量单元组成,测试对象为机匣试验件,试验件布置有特制编码标志点。通过摄

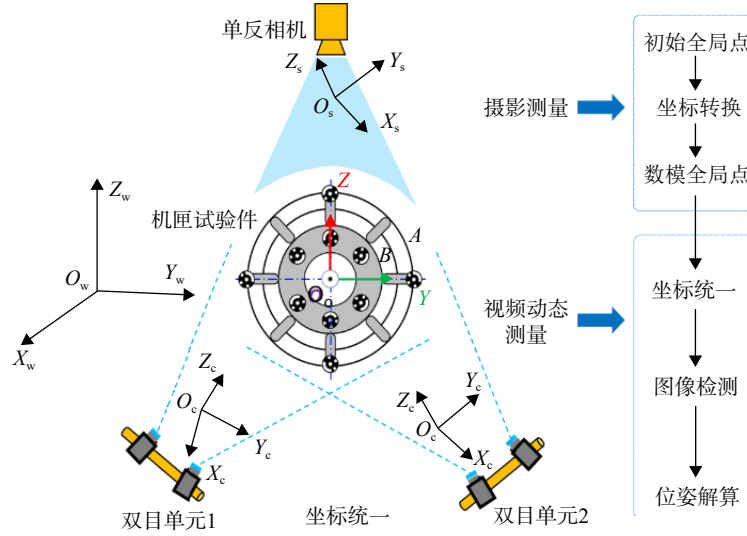


图 1 全局多目视觉测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of global multi-view visual measurement

影测量系统在机匣上建立初始坐标系 O_s , O_0 为被测机匣数模坐标系, O_c 为双目视觉测量相机中以左相机为基准的局部基准坐标系, O_w 为世界坐标系。

1.1 坐标转换参数获取

1.1.1 摄影测量基本原理

摄影测量技术是通过在物体表面及其周围放置编码点, 从不同角度和位置对物体进行拍摄(图 2), 得到符合一定规则和数量的编码点图像, 图像经过灰度处理、编码点的识别、编码点坐标解算, 得到编码点的编码, 利用这些结果, 经过图像相对定向、绝对定向、三维重建、光束平差过程, 最后加入标尺约束及温度补偿, 得到标志点准确的三维坐标。本文借助 XJTUDP 近景摄影测量系统^[14], 准确获得机匣被测表面布设的任意编码点的三维坐标信息, 整体测量精度为 $\pm 0.03 \text{ mm/m}$, 获得的三维全局定义为“初始全局点”。由于机匣数模的坐标中心在某平面圆心上, 且三个坐标的矢量提前给定, 因此预先在机匣被测表面的指定尺寸圆周上布设坐标定位编码点。摄影测量获得的初始全局点包含了定位编码点, 所以可通过定位编码点定义的矢量拟合建立机匣不同平面的坐标矢量, 从而可以利用 3-2-1 坐标转换方法将机匣初始全局坐标系下的初始全局点转换至数模坐标系下, 也即“数模全局点”, 进而将两套双目测量单元坐标与机匣数模的坐标对齐。

1.1.2 全局点坐标系转换方法

由于摄影测量得到的初始坐标系是以拍摄图像特征建立的坐标系, 测量结果只能在图像坐标

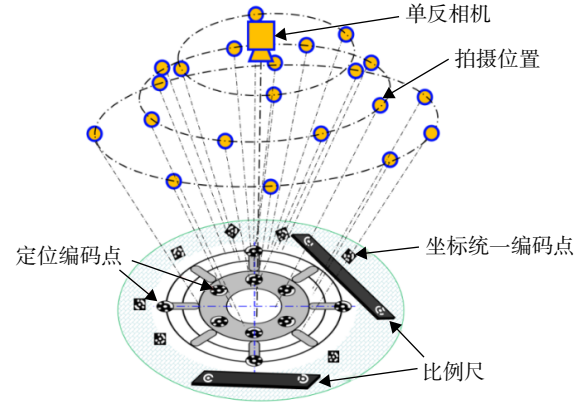


图 2 摄影测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photogrammetry

系下相对比较, 而无法在数模坐标下按照指定矢量进行比对分析, 导致测量结果无法与模型数值仿真结果进行直接对比分析, 因此, 本文运用坐标转换方法将摄影测量得到的初始坐标系转换至模型坐标系下。为确定数模坐标系原点在初始坐标系下的坐标以及坐标系试件的矢量转换矩阵, 坐标转换可分为以下两个步骤:

步骤 1 通过编码点坐标拟合圆确定机匣数模坐标系原点。本文运用最小二乘法拟合机匣数模的坐标原点, 圆心拟合方程见式(1)所示:

$$\min \sum_{i=1}^4 [(X_i - C_a)^2 + (Y_i - C_b)^2 - r^2] \quad (1)$$

式中 X_i 、 Y_i 为编码点平面坐标; C_a 、 C_b 、 r 分别为拟合圆的圆心横坐标、圆心纵坐标、圆半径。测量示意图如图 3 所示, 令机匣在相同半径同心圆内定位高精度编码点 a 、 b 、 d 、 e 四点呈 90° 均布分布,

用于确定机匣数模坐标系矢量,在初始坐标下得到编码点的坐标。由于定位编码点布设在同一圆周上,因此,本文优选三个点拟合机匣数模坐标系原点。简便起见,此处优选点 a 、 b 、 d ,根据式(1)获得圆心在初始全局坐标系下的准确坐标,然后通过 a 、 b 、 d 、 e 四点拟合确定数模坐标中心和坐标系方向矢量。

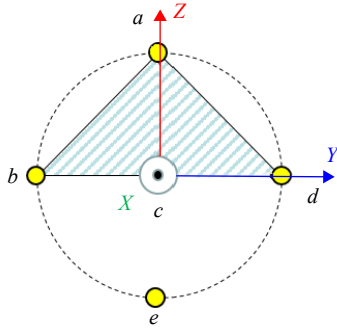


图3 建立数模坐标系

Fig. 3 Establishment of the numerical model coordinate system

坐标系的建立基于 3-2-1 笛卡儿坐标转换原则,选择 a 、 b 、 d 三点构造机匣测量平面,同时得到垂直于纸面朝外平面法线为 x 轴向量 $\mathbf{n}_x$,按照机匣坐标系定义从圆心坐标到 a 点坐标的矢量为 z 轴向量 $\mathbf{n}_z$,通过已知坐标矢量叉乘确定 y 轴向量 $\mathbf{n}_y$,如此即可利用初始定位全局点建立机匣数模坐标系。

步骤 2 将所有初始全局点转换到数模坐标系下。

初始全局点可用来统一两套双目测量单元的坐标系,若初始全局点的坐标被转换至数模坐标系下,可将初始全局坐标系下的双目测量单元的测量坐标统一至数模坐标系下。本文创新性地将摄影测量获得的初始全局点进行了转换。转换可表达为

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{R}_0 \mathbf{X}_s + \mathbf{T}_0 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X}_s$ 为全局点的初始坐标向量, $\mathbf{X}_0$ 为机匣全局点数模坐标系, $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{T}_0$ 为从初始全局坐标系到机匣数模坐标系的旋转平移矩阵。

1.2 双目测量单元坐标统一

1.2.1 基于后方交会的外方位参数解算

后方交会是已知物方点坐标和内方位参数,求解外方位参数,其目的是获取每张图形的外方位参数。该过程中,每个相机的内方位参数已知,

数模全局点在上节中已获得,则可以利用后方交会方法求解每个相机的绝对外方位参数。将小孔成像^[15]的共线方程进行泰勒展开,并进一步细分参数,可以获得捆绑调整的误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X}_1 + \mathbf{B}\mathbf{X}_2 + \mathbf{C}\mathbf{X}_3 - \mathbf{L} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$ 为内方位参数、外方位参数、物体点三维坐标的改正数; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 为内方位参数、外方位参数、物体点坐标对应的偏导数矩阵; $\mathbf{L}$ 为观测的真实值与初值偏差; $\mathbf{V}$ 为像点坐标残差。

后方交会原理如图 4 所示。此处的物方点即是文中第 1.1.2 节中获得的数模全局点。此时对应的误差方程由式(3)简化为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X}_2 - \mathbf{L} \quad (4)$$

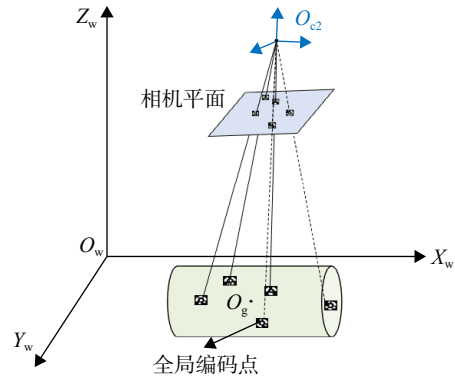


图4 相机外方位参数解算

Fig. 4 Solving the camera's external parameters

因为外方位元素只有六个未知数,所以只需要三个控制点即可进行计算。图像后方交会算法是对非线性方程进行线性化后的迭代计算,因此需要未知数的初值,准确地求取外方位元素的初值非常关键,常用的方法有直接线性变换(DLT)和角锥体法,本文采用角锥体法^[16]求解,得到控制点的三维点坐标和各个视角测量单元的内方位参数后,对式(4)进行最小二乘迭代求解,以误差最小为约束条件优化外方位参数:

$$\min \mathbf{V}^T \mathbf{V} \quad (5)$$

式(5)可用于全局捆绑调整算法中的外方位参数优化,如采用列文伯格-马夸尔特算法^[17]最小化重投影误差。利用式(3)~式(5)进行各个测量单元的绝对外方位参数解算,从而进行坐标转换和统一。

1.2.2 双目测量单元坐标统一

经过全局后方交会解算得到多个视角测量单

元的绝对外参数之后, 就可进行相对坐标转换。如图 5 所示。

步骤 1 首先可将单个双目测量单元的坐标系进行对齐, 以左相机为基准, 有对齐式:

$$[C_i]_i = R_i^{-1} ([C_i]_i - T_i) \quad (6)$$

式中 $[C_i]$ 为右相机坐标系; $[C_i]$ 为左相机坐标系; R_i 、 T_i 为右相机相对左相机的旋转平移矩阵和向量。 i 为立体测量单元的编号, $i=1 \sim n$ 。

步骤 2 多个测量单元的左相机基准坐标系对齐到数模坐标系, 有对齐式:

$$[C_i]_j = R_j^{-1} ([C_i]_j - T_j) \quad (7)$$

式中 $[C_i]$ 为数模坐标系; R_j 、 T_j 为左相机相对数模坐标系的旋转平移矩阵。 j 为左相机的编号, $j=1 \sim n$ 。

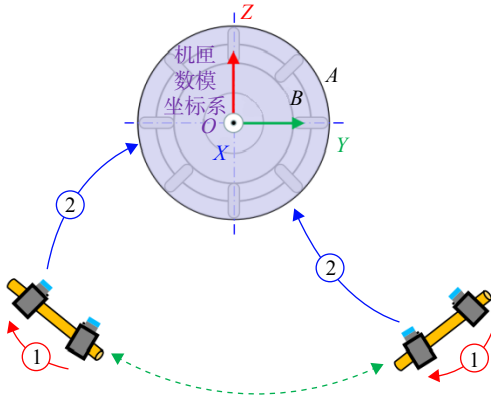


图 5 双目测量单元坐标统一

Fig. 5 Coordinate unification of binocular visual measurement unit

1.3 机匣被测量面相对位姿解算

机匣的位姿测量示意图如图 6 所示, 要解算机匣变形平面的相对位姿变化, 需给定明确的基准坐标系与测量坐标系。由于相对位姿测量的主要目的为研究发动机机匣内环相对外环的位姿变化量, 因此, 本文以发动机外环为基准面建立基准坐标系, 发动机内环为测量面建立测量坐标系, 以文中第 1.2 节的方法通过多目视觉测量系统和定位编码点在模型上建立坐标系。利用三维重建后的定位编码点坐标解算位移和姿态。

图 6 中, O_b 为外环基准坐标系, O_m 为内环测量坐标系, 实际测量中, 外环固定在加载工装上, 内环随加载产生位姿变化。由于内外环中心无法进行直接测量, 且试验加载过程中测量编码点变

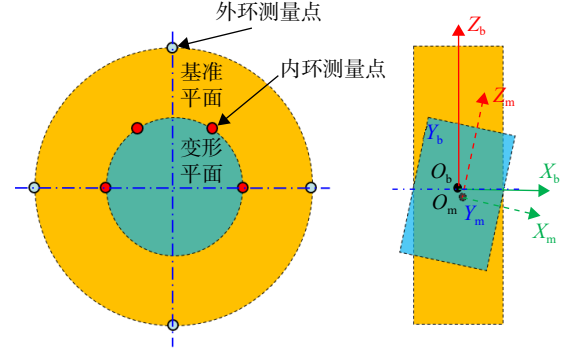


图 6 机匣内、外环的相对位姿测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of relative position and orientation measurement of the inner and outer rings of the casing

形不协调, 因此, 本文再次运用式(1)所示的最小二乘法拟合模型坐标原点。通过双目视觉测量方法得到定位编码点坐标拟合圆心坐标, 运用文中第 1.1 节方法建立坐标系的三维坐标轴。拟合得到圆心, 内环圆心的位移认为是内环的位移, 外环圆心的位移认为是外环的位移。内环相对于外环的位移为

$$\begin{cases} \Delta X_i = X_{mi} - X_{bi} \\ \Delta Y_i = Y_{mi} - Y_{bi} \\ \Delta Z_i = Z_{mi} - Z_{bi} \end{cases} \quad (8)$$

式中 (X_{mi}, Y_{mi}, Z_{mi}) 为各测量状态下的内环圆心坐标, (X_{bi}, Y_{bi}, Z_{bi}) 为各测量状态下的外环圆心坐标, i 表示第 i 个测量状态。

通过得到的内外环坐标矢量计算姿态转换矩阵, 基准坐标系与测量坐标系之间的转换矩阵 R_b 为

$$R_b = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则机匣内环相对外环的姿态变化量可表达为

$$\begin{cases} \theta_x = \arctan(r_{32}, r_{33}) \\ \theta_y = \arctan(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) \\ \theta_z = \arctan(r_{21}, r_{11}) \end{cases} \quad (10)$$

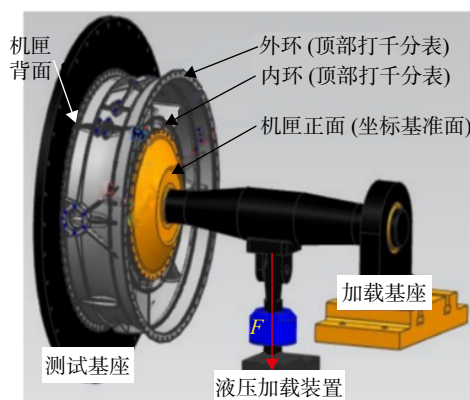
式中 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别是机匣内环或外环在不同变形阶段时相对于 x 、 y 、 z 轴的旋转姿态角。根据式(10), 机匣内、外环之间的时间序列图像测量姿态结果求差, 可解算出机匣的测量面相对于基准面的动态位姿变化^[18]。

2 验证试验

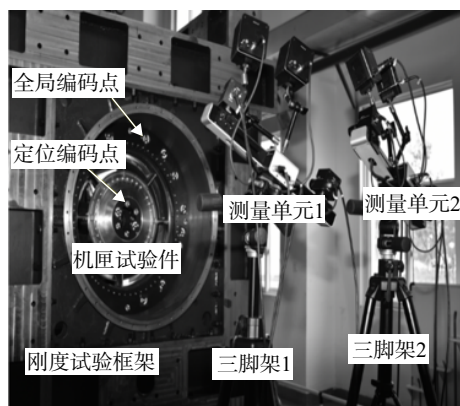
2.1 试验系统搭建

本文的测量系统由摄影测量装置和两套双目视觉测量单元组成,摄影测量的相机为尼康 D7200,分辨率为 6 000 像素 $\times$ 4 000 像素,镜头为 24.0 mm 定焦镜头。双目视觉测量单元相机为 Basler usb3.0 型号,分辨率为 2 448 像素 $\times$ 2 048 像素,像元尺寸为 3.45 μm /像素,配备的镜头型号为 RICOH,焦距为 25.0 mm,相机之间的立体角为 25.5°。机匣内外环相对位姿模拟加载设备为结构静力与疲劳试验器,最大加载载荷为 350 kN,本研究所有的试验均采用该设备参数。

为模拟发动机工作状态下机匣内外环之间的位姿变化,在机匣的内环轴承支点处设计加载装置,利用加载装置施加发动机模拟载荷。试验中,在机匣外环和内环的最顶部布设数显千分表,同步监测机匣变形并与双目视觉测量变形结果对比分析。机匣内外环之间的相对位姿变化由本文设计的全局多目视觉测量系统获取,机匣加载及现场测量如图 7 所示。



(a) 机匣加载示意图



(b) 机匣位姿测量现场图

图 7 机匣加载测量试验现场

Fig. 7 Test site of casing loading measurement

试验中,在模拟机匣上加工定位编码点的定位孔,用于数模坐标系坐标矢量定位,定位孔经三坐标检测位置精度等级为 0.005 mm,并定制了圆形特征编码点,与定位孔配合后,理论定位精度为 0.01 mm。为在摄影测量方法中建立初始全局坐标系,在机匣测量视场范围内设置坐标统一编码点,摄影测量系统通过坐标统一编码点辅助双目视觉测量系统进行全局坐标统一,并将初始全局坐标系转换至机匣数模坐标系,试验中的编码点分布如图 8 所示。

2.2 摄影测量、相机标定和坐标对齐

为在双目视觉测量过程中提供准确的坐标参考,本文设计了摄影测量定位编码点检测及模型坐标转换精度验证。验证试验件采用航空发动机模拟机匣,试验件及坐标定义如图 8 所示。

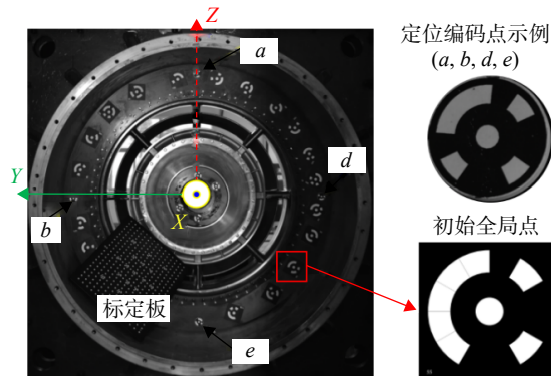


图 8 机匣被测面的坐标定义和编码点布置

Fig. 8 Coordinate definition of casing surface under test and arrangement of coded points

图 8 中,机匣视场范围内,外环的定位编码点位于 y 轴和 z 轴的正向和负向, y 轴正向的定位编码点编号为 180, y 轴负向定位编码点编号为 173, z 轴正向的定位编码点编号为 170, z 轴负向的定位编码点编号为 147,四个外环定位编码点分布在理论直径为 880 mm 的圆上。内环的定位编码点分布在 z 轴直线和与 y 轴矢量成 30° 的直线上, z 轴正向的定位编码点编号为 150, z 轴负向的定位编码点编号为 149,与 y 轴矢量成 30° 的矢量正向的定位编码点为 160,负向的定位编码点为 166,四个内环定位编码点分布在理论直径为 150 mm 的圆上。试验过程中,内外环坐标系原点通过定位编码点的拟合圆确定。

通过摄影测量获得初始全局坐标系下的所有编码点(包括定位编码点和初始全局点)坐标,其中定位编码点的坐标如表 1 所示。

根据文中第 1.1.2 节所示的坐标转换原理,将所有初始全局点坐标转换至机匣数模坐标系下,

表 1 摄影测量定位编码点坐标

Table 1 Coordinates of coded points with photogrammetry

编码 ID	x	y	z
180	0	0	439.976
173	0	-0.028	-439.976
170	0	-439.964	0.093
147	0.011	439.976	-0.003
166	29.920	0.063	-74.974
160	29.940	-0.085	75.022
150	29.911	65.021	-37.480
149	29.977	-64.893	37.565

坐标转换前后的编码点分布对比如图 9 所示。

通过坐标系转换后,机匣试验件的测量坐标系与数模坐标系一致,外环的拟合圆半径 r_{b1} 为 439.976 mm,与理论尺寸偏差 0.024 mm,内环拟合圆的半径为 75.023 mm,与理论尺寸偏差 0.023 mm,外环测量平面与内环测量平面在 x 轴矢量方向的位置关系与机匣数模坐标系矢量定义一致,定位编码点和初始全局编码点的位置可以表达在数模坐标系下。

完成摄影测量并获得数模全局点坐标后,使用经典的八步法^[19-20]进行两组双目测量单元的单独标定和坐标统一。

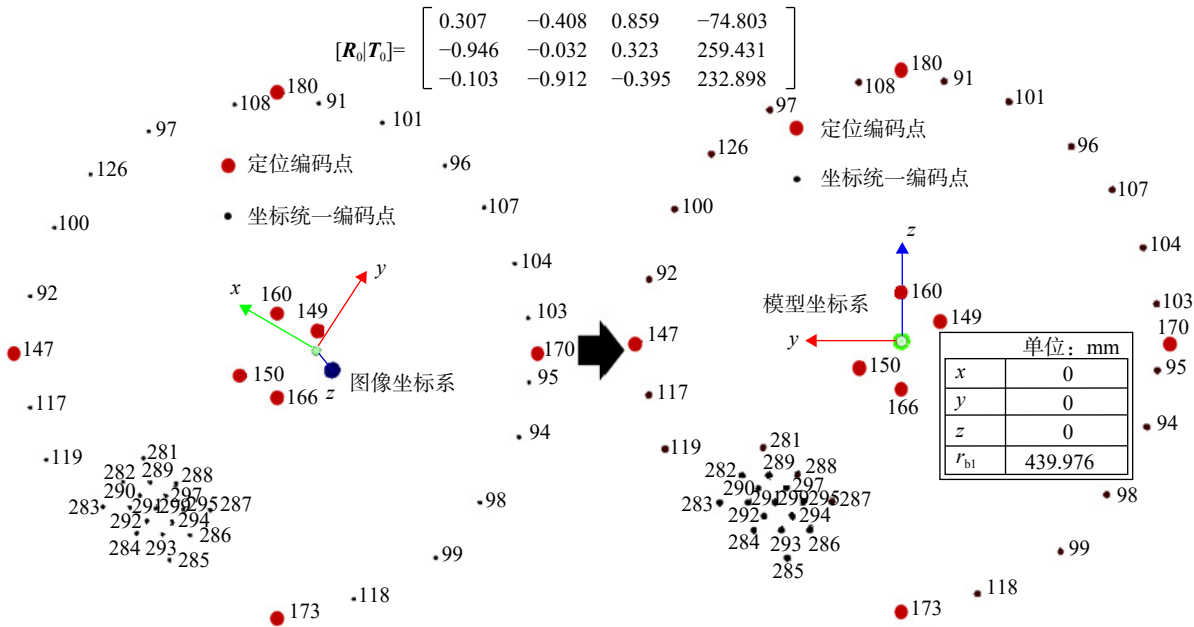


图 9 机匣摄影测量坐标系转换过程

Fig. 9 Processing of casing coordinate system conversion with photogrammetry

2.3 机匣的相对位姿测量试验

双目视觉测量系统通过检测定位编码点和初始全局编码点在数模坐标系下的坐标进行三维重建,重建坐标系也转换至数模坐标系下,三维重建结果如图 10 所示。两套双目视觉单元分别测量各视场范围内的编码点,合并后的视场范围能够满足全部定位编码点的视觉检测。

为验证测量系统标定后数据测量的准确性,试验加载前,运用千分表与双目测量单元的测量数据进行对比,试验用千分表的有效精度为 0.003 mm,在图 7 所示机匣位置安装边处安装千分表测量机匣内外环 z 向位移,千分表测量对比试验现场如图 11 所示,千分表测量点处分别粘贴编码点,机匣施加调试载荷后,两种测量方法得

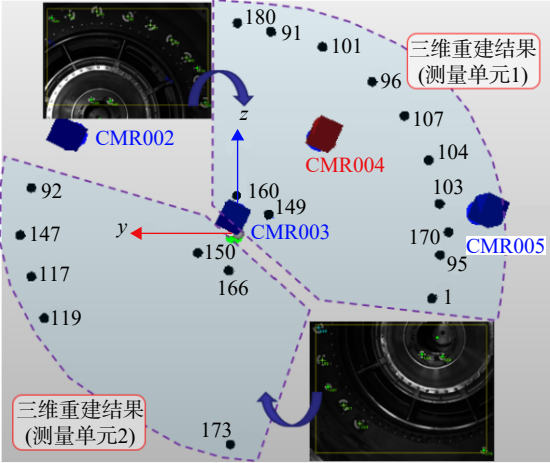


图 10 两套双目测量单元的图像检测及三维重建结果

Fig. 10 Image detection and 3D reconstruction results of two sets of binocular visual measurement units

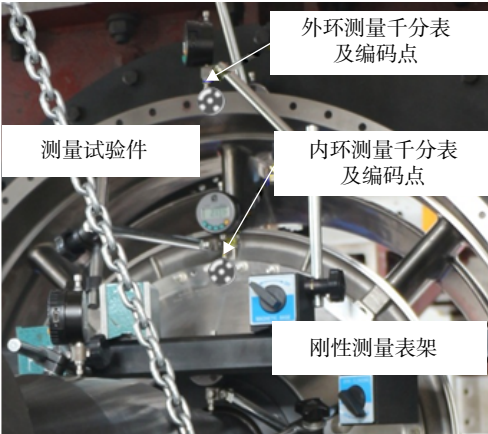


图 11 千分表现场对比测量图

Fig. 11 Comparison of the field measurement of the micrometers

到的位移数据如表 2 所示, 调试载荷为最大载荷的 50%。

表 2 中, 内外环的相对位移为两个测量位置结果相减, 两套测试装置的位移最大差值为 0.005 mm, 相对位移相差 0.002 mm, 满足系统设计要求。

双目视觉测量系统准备完成后, 在机匣内环上加载模拟载荷, 通过双目视觉测量装置在机匣内外环上分别建立测量平面和基准平面, 测量内外环的姿态及两者的相对变化。试验加载的最高

表 2 双目测量位移与千分表结果对比

Table 2 Comparison of the displacement results with the binocular vision and micrometer mm

位置	双目测量结果	千分表结果	差值
外环	0.036	0.031	0.005
内环	0.058	0.055	0.003

载荷为-40 kN, 载荷以 8 个阶梯步单调加载, 试验过程中, 机匣外环固定在试验台架上, 加载装置在机匣内环中心点 z 轴负方向加载, 模型坐标系下内环和外环的定位编码点位移变化及加载载荷如图 12 所示, 图中, 位移曲线与文中所述编码点编号对应。

加载试验中, 通过双目视觉测量结果可以看出机匣内外环测量平面在数模坐标系的 z 向及 x 向均有位移变化, y 向位移较小, 可以忽略, 说明机匣加载过程中除产生平面位移外, 还产生沿坐标轴的姿态变化, 这是由于机匣内外环中心存在沿 x 轴的偏心距导致。图 12 中, 机匣外环平面的定位编码点的位移不为零, 说明机匣内外环相对初始建立的模型基准坐标系发生变形, 内环和外环之间有相对位移变化。机匣内外环拟合圆心的位移曲线如图 13 所示。图 12 为外环圆心和内环圆心在三个坐标矢量上的绝对位移, 曲线编号为定位编码点编号。

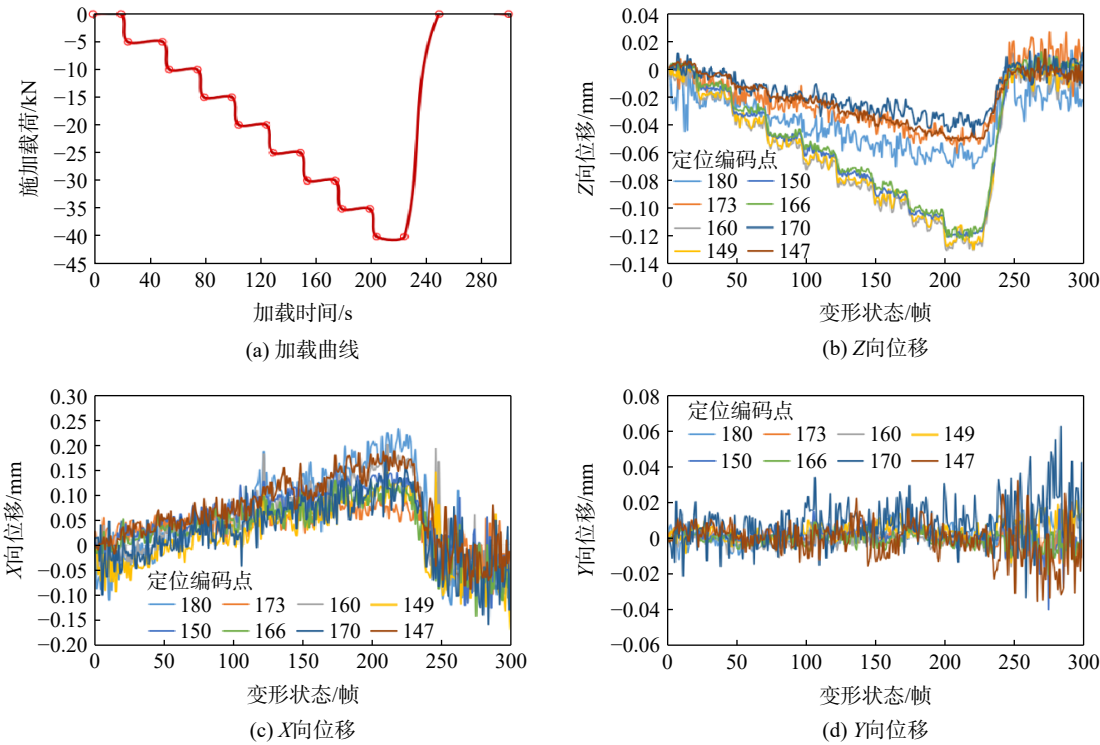


图 12 机匣加载及定位编码点位移曲线

Fig. 12 Displacement curves of coded point under the casing load

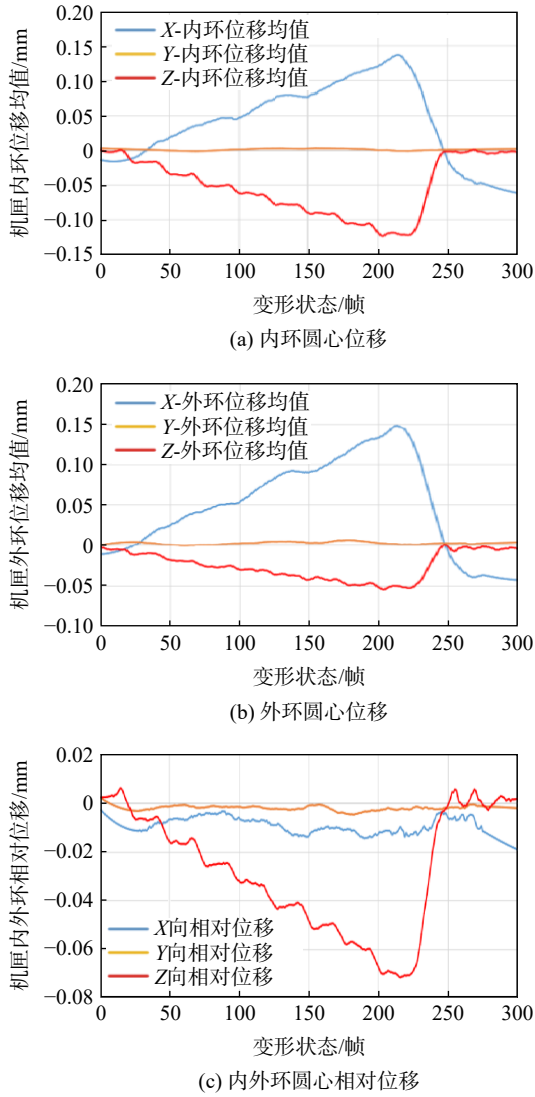


图 13 机匣内外环圆心位移曲线

Fig. 13 Displacement curves of casing inner and outer ring center

图 13 为机匣内外环拟合圆心的相对位移, 其中, z 向最大相对位移变化为 0.0709 mm 。为直接测量机匣内外环表面的相对姿态变化, 本文将外环定位编码点建立的坐标系转换为基准坐标系, 内环定位编码点建立的坐标系为测量坐标系, 得到内外环表面的相对姿态变化, 机匣变形过程中内、外环之间的相对姿态变化如图 14 所示。图 14(a)、图 14(b) 为机匣内外环绝对位姿变化, 图 14(c) 为内环与外环的相对姿态变化, 可见沿 x 向和 z 向的姿态变化很小, 沿 y 轴的转动为 0.024° , 与实际变化趋势一致。

综上所述, 本文所提的测量方法可稳定地获得机匣刚度试验中内外环的位移和姿态数据, 并能够计算位姿的相对变化, 为航空发动机机匣的刚度试验提供了一种可靠的数据支撑。

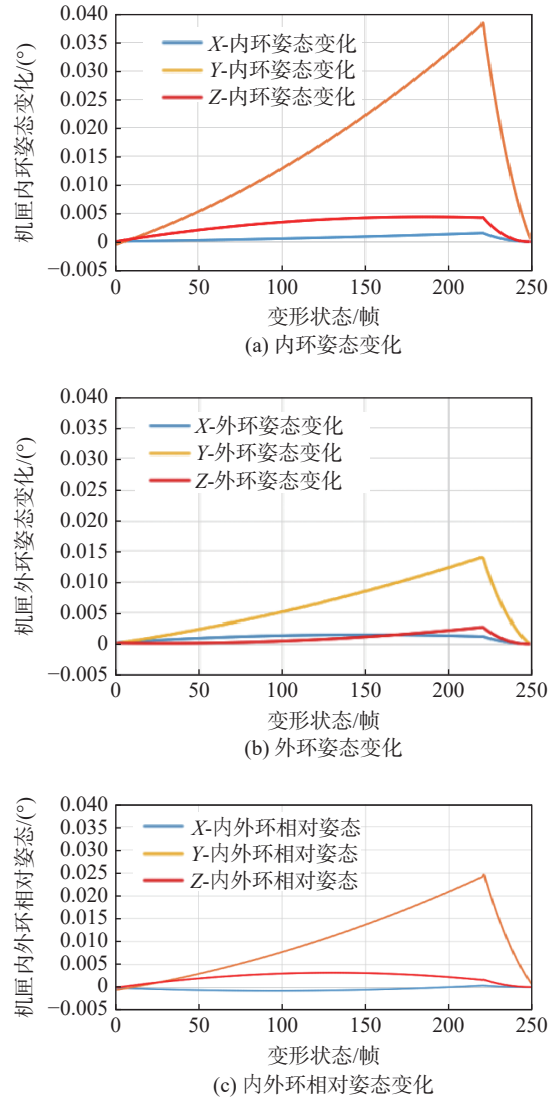


图 14 机匣内外环姿态曲线

Fig. 14 Orientation curves of casing inner and outer rings

3 结 论

本文在双目视觉位姿测量的基础上提出了一种多目视觉动态位姿测量方法, 可有效解决航空发动机机匣的三维动态位姿测量问题。通过摄影测量方法进行全局坐标统一, 借助编码点的矢量定位和笛卡尔坐标转换方法进行坐标系转换, 形成了一套基于数模坐标系的机匣内外环表面相对位姿测量系统。

1) 基于该系统开展了机匣刚度试验, 与理论尺寸相比, 多目视觉动态位姿测量方法的尺寸测量误差小于 0.025 mm , 总结了误差产生的来源。

2) 对比了传统千分表测量方法与所提方法在单一方向的测量精度, 该方法的位移测量误差小于 0.005 mm , 创新性地提出了数模坐标系下的视觉位姿测量方法, 并验证了方法的准确性。

3) 首次将多目视觉动态位姿测量方法应用到机匣相对位姿动态测量中, 获得了机匣加载状态下内外环表面的位姿测量数据, 并有效避免了传统测量方法中测量设备本身坐标难以准确定位及刚体位移的影响, 解决了常规双目视觉测量系统的测量坐标转换、定位问题, 这些数据在发动机研制过程中有较大的应用前景。

文中在完成坐标转换后, 测量数据还存在一定的测量误差, 并可能导致累积误差, 后续还将在坐标转换精度及编码点定位方法上做进一步研究, 提高多目视觉位姿测量方法精度。

参考文献:

- [1] 毕超, 张超, 徐昌语. 机匣类零件几何变形测量方法的研究与探索[J]. *航空精密制造技术*, 2022, 58(1): 2-6.
BI Chao, ZHANG Chao, XU Changyu. Study and exploration on measuring method of geometric deformation of casings[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2022, 58(1): 2-6. (in Chinese)
- [2] LUO P F, CHAO Y J, SUTTON M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. *Experimental Mechanics*, 1993, 33(2): 123-132.
- [3] 丁水汀, 王子尧, 李烨. 数字散斑相关方法用于圆盘表面热变形测量[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(11): 2665-2671.
DING Shuiting, WANG Ziyao, LI Ye. Application of digital speckle correlation method to disk surface thermal deformation measurement[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(11): 2665-2671. (in Chinese)
- [4] PAN Bing. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001.
- [5] LI Junrui, XIE Xin, YANG Guobiao, et al. Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 19-25.
- [6] 姜爱民, 李高春, 郭宇, 等. 黏接界面试件拉伸变形破坏过程的数字散斑相关方法分析[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(5): 1242-1248.
JIANG Aimin, LI Gaochun, GUO Yu, et al. Investigation on adhesive interface specimen deformation and failure process under tension using digital speckle correlation method[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(5): 1242-1248. (in Chinese)
- [7] 潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1212001.
PAN Jiyu, ZHANG Shuiqiang, SU Zhilong, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1212001. (in Chinese)
- [8] 王永红, 朱奕磊, 高启学, 等. 基于数字图像相关法的空间目标位姿测量[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0812001.
WANG Yonghong, ZHU Yilei, GAO Qixue, et al. Position and pose measurement of spatial object based on digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0812001. (in Chinese)
- [9] LI Leigang, LIANG Jin, GUO Xiang, et al. Full-field wing deformation measurement scheme for in-flight cantilever monoplane based on 3D digital image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 065202.
- [10] 张淑平, 丁永生, 郝矿荣, 等. 基于立体视觉六自由度大载荷实验平台的位姿检测[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(6): 1744-1746.
ZHANG Shuping, DING Yongsheng, HAO Kuangrong, et al. Measurement of position and orientation of 6-DOF large load test platform based on stereo vision[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(6): 1744-1746. (in Chinese)
- [11] 马瑾, 张国峰, 戴树岭, 等. 基于相对视觉位姿的 Stewart 平台运动学标定[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(9): 2267-2274.
MA Jin, ZHANG Guofeng, DAI Shuling, et al. Kinematic calibration of Stewart platform based on relative visual pose[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(9): 2267-2274. (in Chinese)
- [12] 邱红采, 彭芳瑜, 唐小卫, 等. 机器人铣削加工误差视觉跟踪测量与补偿研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(14): 35-43.
DI Hongcai, PENG Fangyu, TANG Xiaowei, et al. Research on vision tracking measurement and compensation of robot milling error[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(14): 35-43. (in Chinese)
- [13] 刘岩, 雷柏平, 杜俊峰, 等. 基于特征点识别的位姿测量数据处理方法研究[J]. *半导体光电*, 2021, 42(4): 568-573.
LIU Yan, LEI Boping, DU Junfeng, et al. Research on pose measurement data processing method based on feature point recognition[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(4): 568-573. (in Chinese)
- [14] ZHANG Dehai, JIN Liang, GUO Cheng, et al. Exploitation of photogrammetry measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(3): 037005.
- [15] 冯文灏. 工业测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
FENG Wenhao. Commercial measurement[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004. (in Chinese)
- [16] TANG Zhengzong, LIANG Jin, GUO Cheng, et al. Photogrammetry-based two-dimensional digital image correlation with nonperpendicular camera alignment[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(2): 023602.
- [17] MORE J J. The Levenberg-Marquardt algorithm implementation and theory[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [18] 杨利伟. 基于正交位移测量系统的六自由度并联机构参数标定研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
YANG Liwei. Research on parameter calibration of 6-DOF parallel mechanism based on orthogonal displacement measurement system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [19] TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Three-dimensional digital image correlation system for deformation measurement in experimental mechanics[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(10): 103601.
- [20] 胡浩, 魏斌, 梁晋, 等. 大视场远距离视觉测量系统的分步标定[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(4): 478-488.
HU Hao, WEI Bin, LIANG Jin, et al. Two-step calibration for vision measurement system with large field of view and high depth[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(4): 478-488. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)