

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513768

# 航空壁板柔性装配中关键形位参量计算测量方法\*

陈启航, 张洋, 逯永康, 崔家诚, 刘巍

(大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室 大连 116024)

**摘要:**柔性装配已成为弱刚性航空壁板柔顺装配技术的发展趋势。在此过程中,壁板定位目标与实时面形等关键形位参量的在线测量,是实现高保形、低应力的壁板柔顺装配的前提。然而,装配过程中测量空间狭小、近封闭,测量可达性不足,加之弱刚性壁板形状稳定性低,易发生随机变形,壁板面形直接测量的效率与精度难兼顾,致使上述关键形位参量的在线测量极具挑战。为此,提出了一种航空壁板柔性装配中关键形位参量计算测量方法,通过稀疏可测数据与物理解析模型融合,实现了壁板定位目标与实时面形等直接测量不可达形位参量的在线测量。首先,提出了模态叠加的壁板定位目标计算测量方法,结合结构模态振型与稀疏可测点位移,实时计算出定位工装全局位移,实现了壁板定位目标的在线测量;然后,提出了几何方程约束的壁板面形计算测量方法,以位移-应变关联为约束,结合离散应变测量,实现了壁板面形的在线测量;最后,为了验证所提方法的有效性 & 精度,搭建了飞机平尾壁板柔性装配缩比实验平台,开展了关键形位参量在线监测实验。结果表明,所提方法壁板定位目标在线测量误差 $<75.1\ \mu\text{m}$ ,壁板面形在线测量误差 $<18.11\%$ ,单次计算测量耗时分别 $<0.005$  和  $0.01\ \text{s}$ ,为航空壁板柔性装配提供了关键数据支撑,推动了柔性航空装配技术升级。

**关键词:** 计算测量;形位参量;航空壁板;柔性装配

**中图分类号:** TH165 V262 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.45

## Computational measurement method for key geometric parameters in the flexible assembly process of aircraft panels

Chen Qihang, Zhang Yang, Lu Yongkang, Cui Jiacheng, Liu Wei

(State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Flexible assembly has emerged as the dominant technique for the compliant assembly of low-stiffness aircraft wall panels. Critical to this process is the online measurement of key geometric parameters—such as panel positioning targets and real-time surface profiles—to ensure high precision and minimal residual stress. However, the restricted accessibility within the confined, near-enclosed tooling environment, coupled with the inherently poor shape stability of low-stiffness panels, renders direct measurement methods inefficient and prone to errors, creating significant obstacles for real-time monitoring. To address these challenges, this paper introduces a computational measurement approach for estimating key geometric parameters during flexible panel assembly. By combining sparse measurable data with physics-based analytical models, the method enables real-time estimation of parameters that are otherwise difficult to access directly. Specifically, a modal superposition-based technique is developed to compute the global displacement of positioning tooling from limited displacement measurements, facilitating continuous tracking of panel positioning targets. Additionally, a surface profile reconstruction method is proposed, which integrates geometric constraints and the displacement-strain relationship to fuse discrete strain data for real-time shape estimation. Validation was conducted on a downscaled platform simulating the flexible assembly of aircraft horizontal tail panels. The results demonstrate that the proposed method achieves positioning target measurement errors below  $75.1\ \mu\text{m}$  and surface profile errors under  $18.11\%$ , with computation times shorter than  $0.005\ \text{s}$  and  $0.01\ \text{s}$ , respectively. This method provides reliable real-time data support for compliant aircraft panel assembly and advances the development of flexible assembly technologies in aerospace manufacturing.

**Keywords:** computational measurement; geometric parameter; aircraft panel; flexible assembly

收稿日期: 2025-02-22 Received Date: 2025-02-22

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52125504)、大连市高层次人才创新支持计划(2023RG001)项目资助

## 0 引言

弱刚性航空壁板是外翼、平尾等大型飞机核心承力部件的重要零组件,其高质量柔顺性装配是确保该类部件气动外形的精确度与稳定性,进而保障飞机服役性能和安全性的重要前提<sup>[1-4]</sup>。随着数字化制造技术的进步,柔性装配已逐渐成为弱刚性航空壁板柔顺装配的发展趋势<sup>[5-7]</sup>,即通过壁板定位机构末端的执行器,在装配过程中对壁板的位姿及几何形状进行在线主动调控,以实现符合设计要求的精准、柔顺装配。这一过程中,需要实时获取壁板装配基准零组件定位工装的位移状态,及壁板的变形状态,实现壁板定位目标与实时面形等关键形位参数的在线测量,为待装配壁板位姿及面形的调控提供依据,以实现高保形、低应力的壁板柔顺装配。然而,工装受待装配零组件、操作人员等的多重遮挡,测量空间狭小近封闭,甚至部分工装-零组件定位连接面完全封闭不可测;同时,航空壁板的厚长比通常不足 1/3 000,属于典型的弱刚性薄壁结构,其形状稳定性低,在柔性装配过程中受重力、装夹力等多类型载荷作用易发生非确定性随机变形,复杂、时变面形的测量精度与实时性难兼顾。综上,壁板定位目标与实时面形的在线测量极具挑战,发展装配过程中关键形位参数的在线测量技术,已成为壁板柔性装配技术升级的亟需。

国内外学者在基于刚性工装的航空壁板装配形位参量测量方面已经开展了诸多研究工作。其中,在航空装配定位信息的测量方面,主要分为基于激光测量的定位信息离线检测和基于双目视觉的定位信息实时监测两类<sup>[8]</sup>。基于激光测量的定位信息离线检测技术,主要是通过激光跟踪仪<sup>[9-12]</sup>等高精度激光测量设备,对工装及地面的增强坐标系测量点(enhance reference system, ERS)及光学工具点(optical tooling points, OTP)等进行坐标测量,以实现壁板装配定位信息的测量<sup>[13-14]</sup>。该类方法可测范围广、测量精度高,目前已在壁板装配中得到了广泛应用。然而,该类方法仅能实现逐点离线测量,以某型客机平尾升降舵壁板装配过程为例,其装配定位工装尺寸可达 7 m×3 m,离线检测壁板装配定位信息时,需通过激光跟踪仪测量工装上所有 ERS 及 OTP 点,测点数量达数百个,耗时达 4 h 以上,难以满足壁板柔性装配中壁板定位目标的在线测量需求。而基于双目视觉的定位信息实时监测技术具备高效、受环境影响小等优势,可以解决激光测量方法测量效率不足的问题<sup>[15-20]</sup>。然而,装配过程中狭小封闭的测量空间,严重制约了双目视觉系统的测量可达性,难以全面的获取工装位移状态,亦难以实现壁板定位目标的在线测量。在壁板面形测量方面,目前主要通过激光测量及视觉测量两种方式完成。其中,壁板面形激光测

量法主要通过激光跟踪仪、激光扫描仪等对待测结构的表面点云进行测量<sup>[21-25]</sup>,而后通过点云拟合与配准实现面形测量。而壁板面形的视觉测量法则是通过单目或双目视觉系统测量投影或粘贴在结构表面的辅助特征,而后通过测量结果离线拟合结构面形<sup>[26-29]</sup>。上述两种方法均有较高测量精度,能够准确的获取被测结构面型,并已经广泛应用于航空航天零组件面形测量中<sup>[30]</sup>。但测量数据的处理过程通常需要消耗数分钟至数十分钟时间,难以满足柔性装配中壁板面形的在线测量需求。

为此,针对现有测量手段可达性与实时性不足,难以实现关键形位参量在线测量的问题,提出了一种航空壁板柔性装配中关键形位参量计算测量方法,将稀疏可测数据与物理解析模型相融合,实现了壁板柔性装配中壁板定位目标与实时面形信息等直接测量不可达形位参数的在线测量。首先,提出了模态叠加的壁板定位目标计算测量方法,通过双目视觉系统测量可测区域稀疏点位移,并基于截断的基准零组件定位工装模态振型物理模型构建了局部可测位移与结构全局位移间的映射关系,实时计算出工装全局位移状态,实现了壁板定位目标的在线测量;然后,提出了几何方程约束的弱刚性壁板面形计算测量方法,以结构位移-应变几何方程为桥梁,构建了离散测量应变与全局面形间的映射模型,实现了柔性装配过程中壁板面形的实时测量;最后,为了验证所提方法的在线测量效果,搭建了飞机平尾壁板柔性装配缩比实验平台,开展了形位参量在线测量实验。结果表明,所提方法能够准确、快速的计算壁板定位目标与实时面形,为航空壁板的高质量柔顺装配提供了关键数据支撑。

## 1 壁板柔性装配形位参量计算测量方案

本研究面向典型航空壁板柔性装配场景,提出了一种关键形位参量计算测量方法,为壁板的高质量柔顺装配提供了关键数据支撑。面向狭小近封闭空间中壁板定位目标的在线测量需求,提出了模态叠加的定位目标计算测量方法,首先通过双目视觉测量壁板装配基准零组件定位工装的非遮挡区域局部位移信息;然后,通过有限元模态仿真分析获取了工装各阶位移模态振型,并提出了一种基于模态有效质量分数的模态选择判据,实现了结构主要位移模态的截断选择,降低了计算复杂度;最后,结合实测位移数据动态解算模态坐标,并以模态坐标为权重叠加各阶位移振型,构建了局部可测位移信息与工装全局位移状态间的关联映射模型,实现了壁板定位目标的在线测量。同时,面向壁板实时面形的在线测量需求,提出了几何方程约束的弱刚性壁板面形计算测量方法,首先对被测结构进行壳单元网格离散;然后,以 Mindlin 厚壳理论作为运动学框架,以单元几何方程为约束构建了单元



式中:  $\Phi_m$  为结构所选  $m$  阶模态的振型矩阵;  $\mathbf{y}_m(t)$  则为对应的模态坐标。  $\Phi_m$  可以通过离线测试或有限元分析得到, 而  $\mathbf{y}_m(t)$  则需要通过结构上  $k$  个位移测点的测量值  $\mathbf{d}_k$  实时解算。

$$\mathbf{y}_m(t) = (\Phi_{km}^T \Phi_{km})^{-1} \Phi_{km} \mathbf{d}_k \quad (8)$$

式中:  $\Phi_{km}$  是由测点处模态振型组成的局部模态振型矩阵, 而后将式(8)代入式(7)即可实现基准零组件定位工装全局位移的计算测量, 即:

$$\begin{cases} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} \phi_1^1 & \phi_1^2 & \cdots & \phi_1^m \\ \phi_1^2 & \phi_2^2 & \cdots & \phi_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1^n & \phi_2^n & \cdots & \phi_m^n \end{bmatrix} \begin{cases} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{cases} =$$

$$\Phi_m (\Phi_{km}^T \Phi_{km})^{-1} \Phi_{km} \mathbf{d}_k \quad (9)$$

进而, 可以通过实时高精的双目视觉系统对可见区域内稀疏点位移进行实时测量, 测点位移可表示为:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{T}_C^W (\mathbf{p}_v^C - \mathbf{p}_{i0}^C) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{CW} \begin{bmatrix} X_v^C - X_{i0}^C \\ Y_v^C - Y_{i0}^C \\ Z_v^C - Z_{i0}^C \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{p}_v^C$  和  $\mathbf{p}_{i0}^C$  分别为相机坐标系下稀疏测点当前坐标和初始坐标;  $\mathbf{T}_C^W$  为相机坐标系到世界坐标系的转换矩阵。将实时测量到的  $\mathbf{d}_k$  代入式(9)即可在装配过程中实现航空壁板定位目标的在线测量。

### 3 弱刚性壁板面形计算测量方法

壁板面形状态在线测量是实现面形反馈控制, 进而确保壁板气动外形合格的必要前提。为此, 本章提出了一种几何方程约束的薄壁结构面形计算测量方法, 以结构几何方程为桥梁, 构建了离散测量应变与全局面形间的映射模型, 实现了弱刚性壁板实时面形的在线测量。

首先, 将结构划分为图2所示的壳结构分析单元, 根据 Mindlin 理论, 每个单元中的位移场可以表示为:

$$\begin{cases} u(x, y) \equiv u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i + \sum_{i=1}^4 L_i \theta_{zi} \\ v(x, y) \equiv v = \sum_{i=1}^4 N_i v_i + \sum_{i=1}^4 M_i \theta_{zi} \\ w(x, y) \equiv w = \sum_{i=1}^4 N_i w_i - \sum_{i=1}^4 L_i \theta_{xi} - \sum_{i=1}^4 M_i \theta_{yi} \\ \theta_x(x, y) \equiv \theta_x = \sum_{i=1}^4 N_i \theta_{xi} \\ \theta_y(x, y) \equiv \theta_y = \sum_{i=1}^4 N_i \theta_{yi} \end{cases} \quad (11)$$

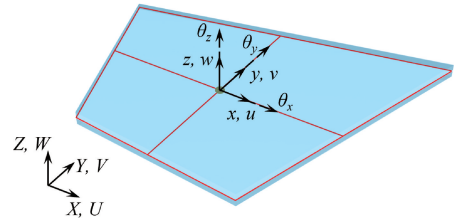


图2 离散分析单元及其坐标系

Fig. 2 Discrete element and its coordinate systems

式中:  $u, v, w, \theta_x, \theta_y$  分别为单元局部坐标系  $(x, y)$  处的位移自由度;  $N_i$  为四节点壳单元的形函数;  $L_i, M_i$  为定义单元旋转自由度与膜位移之间关联的映射变量<sup>[32]</sup>。单元的几何方程可以描述为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial \theta_x}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + z \left( \frac{\partial \theta_y}{\partial y} - \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) \\ \gamma_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_y \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_x \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{cases} \equiv \mathbf{e}(\mathbf{u}_e) + z \mathbf{k}(\mathbf{u}_e) = \mathbf{B}^m \mathbf{u}_e + z \mathbf{B}^b \mathbf{u}_e \quad (13)$$

$$\begin{cases} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{cases} \equiv \mathbf{g}(\mathbf{u}_e) = \mathbf{B}^s \mathbf{u}_e \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{B}^m, \mathbf{B}^b, \mathbf{B}^s$  分别为映射膜应变、曲率应变和面内扭转应变的参数矩阵, 由  $N_i, L_i, M_i$  的一阶导数构成。  $\mathbf{u}_e = [\mathbf{u}_e^1 \ \mathbf{u}_e^2 \ \mathbf{u}_e^3 \ \mathbf{u}_e^4]^T$ , 且有:

$$\mathbf{u}_e^i = [u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi}]^T \quad (15)$$

进而, 可以根据上述几何方程关系建立单元应变的最小二乘误差函数:

$$\Phi(\mathbf{u}_e) = \|\mathbf{e}(\mathbf{u}_e) - \mathbf{e}_M\|_{\omega_m}^2 + \|\mathbf{k}(\mathbf{u}_e) - \mathbf{k}_M\|_{\omega_b}^2 + \|\mathbf{g}(\mathbf{u}_e) - \mathbf{g}_M\|_{\omega_s}^2 \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{e}_M, \mathbf{k}_M$  和  $\mathbf{g}_M$  分别为单元中性面的膜应变、曲率应变和面内扭转应变的测量值, 上述测量值可以通过布置在结构表面的应变传感器获取;  $\omega_m, \omega_b$  和  $\omega_s$  分别为各误差项对应的权重, 可以根据各项应变的测量结果确定。进而, 将式(13)和(14)代入式(16), 得:

$$\Phi(\mathbf{u}_e) = \mathbf{u}_e^T \mathbf{k} \mathbf{u}_e - 2\mathbf{u}_e^T \mathbf{f} + c \quad (17)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{k}_i &= \iint_{\Omega} (\omega_m^i \mathbf{B}^{mT} \mathbf{B}^m + (2h_i)^2 \omega_b^i \mathbf{B}^{bT} \mathbf{B}^b + \\ &\quad \omega_g^i \mathbf{B}^{gT} \mathbf{B}^g) dx dy \\ \mathbf{f}_i &= \frac{1}{n} \iint_{\Omega} \sum_{j=1}^n (\omega_m^i \mathbf{B}^{mT} \mathbf{e}_M^{i,j} + (2h_i)^2 \omega_b^i \mathbf{B}^{bT} \mathbf{k}_M^{i,j} + \\ &\quad \omega_g^i \mathbf{B}^{gT} \mathbf{g}_M^{i,j}) dx dy \\ \mathbf{c}_i &= \frac{1}{n} \iint_{\Omega} \sum_{j=1}^n (\omega_m^i (\mathbf{e}_M^{i,j})^T \mathbf{e}_M^{i,j} + \\ &\quad (2h_i)^2 \omega_b^i (\mathbf{k}_M^{i,j})^T \mathbf{k}_M^{i,j} + \omega_g^i (\mathbf{g}_M^{i,j})^T \mathbf{g}_M^{i,j}) dx dy \end{aligned} \right. \quad (18)$$

对误差函数求解最小化变分时,可得:

$$\frac{\partial \Phi(\mathbf{u}_e)}{\partial \mathbf{u}_e} = \mathbf{k} \mathbf{u}_e - \mathbf{f} = 0 \quad (19)$$

则单元位移可以求解为:

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{k}^{-1} \mathbf{f} \quad (20)$$

此后,将局部坐标系下的单元位移转换到全局坐标系下即可实现壁板全局位移的计算测量。进而在装配过程中,使用电阻应变片实时测量壁板局部应变,并代入上述流程,即可实现壁板实时面形的在线测量。

### 4 实验与结果分析

为了验证所提关键形位参量计算测量方法的效果,搭建了包括缩比工装型架、前梁定位器、缩比前梁、缩比壁板、柔性执行机构等在内的飞机平尾壁板柔性装配缩比实验平台,以开展壁板定位目标与实时面形的在线测量实验,如图 3 所示。

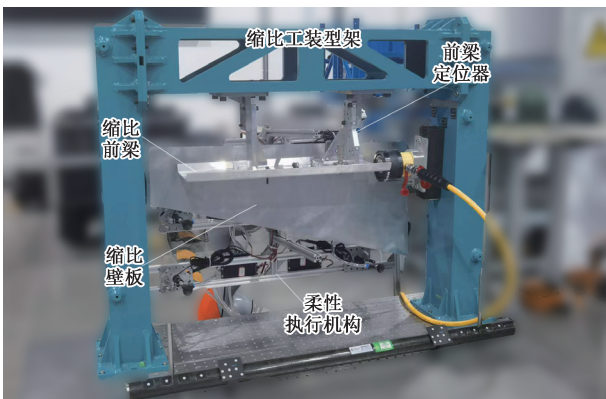


图 3 飞机平尾柔性装配缩比实验平台

Fig. 3 Downscaled flexible assembly test platform for aircraft horizontal tail

#### 4.1 壁板定位目标在线测量实验

首先,对平尾壁板的装配基准零组件,即平尾前梁的定位工装进行全局位移实时计算,以验证壁板定位目标在线测量的效果,如图 4 所示。本实验中,局部位移的在

线监测由郑州辰维 MPS/M20 双目摄影测量系统实现(误差:8 μm+8 ppm·L),精度验证参考点位移则通过郑州辰维 MPS/CIM-3 单目测量系统进行测量(误差:4 μm+4 ppm·L)。

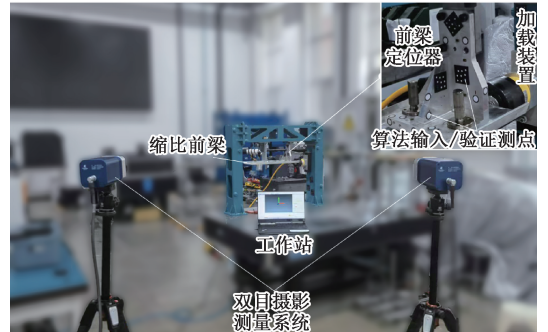


图 4 壁板定位目标在线测量实验平台

Fig. 4 Experimental platform for online measurement of panel positioning targets

首先,对工装前梁定位器进行模态分析,并获取其各阶模态的有效质量分数,如表 1 所示。根据所提出的模态选择判据,选择前 10 阶模态用于构建板定位目标计算测量模型。

表 1 前梁定位器模态有效质量分数

Table 1 Modal effective mass fractions of the front spar positioner (%)

模态阶数	x	y	z
1 阶	71.87	6.42	0.56
2 阶	1.44	0.37	29.60
3 阶	0.12	1.93	40.65
4 阶	0.08	0.05	11.74
5 阶	20.01	31.43	0.12
6 阶	0.34	0.06	0.55
7 阶	4.21	1.64	0.85
8 阶	0.01	44.14	5.29
9 阶	0.18	2.46	0.03
10 阶	0.15	7.56	4.58
合计	98.42	96.07	93.96

为验证定位目标计算精度,通过加载装置在前梁上分别施加 1 000、2 000 和 3 000 N 的载荷模拟强迫装配时的装配载荷,期间通过双目摄影测量系统实时采集 6 个输入测点的位移并通过所提方法重构前梁定位器全局位移,实现壁板定位目标的在线测量。值得注意的是每个输入测点处均可获得三维位移,即上述测点设置可以获取至多 18 个位移测量信息,以实现 10 阶模态的叠加计

算。同时,在定位器上设置了6个验证点,以精度更高的单目测量系统获取装配中验证点位移参考值,以此评估所提计算测量方法的精度。输入测点和验证点位置如图5所示。

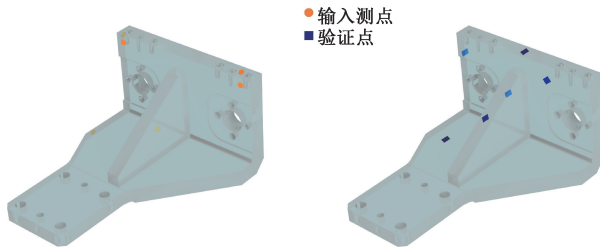


图5 位移输入测点和验证点位置

Fig. 5 Locations of displacement input measurement points and validation points

各个验证点的位移计算测量结果及全部实验组下的验证点位移重构误差统计结果如表2和图6所示。

表2 壁板定位目标在线测量实验结果

Table 2 Results of the online measurement experiment for panel positioning targets (mm)

验证点编号	名称	1 000 N 加载	2 000 N 加载	3 000 N 加载
	参考值	1.757 0	2.332 1	3.094 8
验证点 1	计算测量	1.792 0	2.393 1	3.140 0
	测量误差	0.035 1	0.061 0	0.045 2
	参考值	2.508 7	3.334 1	4.471 6
验证点 2	计算测量	2.434 5	3.265 3	4.455 8
	测量误差	0.074 2	0.068 8	0.015 7
	参考值	2.262 1	3.057 0	4.031 9
验证点 3	计算测量	2.229 4	2.986 2	3.987 6
	测量误差	0.032 8	0.070 8	0.044 4
	参考值	2.591 8	3.428 2	4.517 5
验证点 4	计算测量	2.538 3	3.388 2	4.469 1
	测量误差	0.053 5	0.040 0	0.048 4
	参考值	1.484 5	1.957 7	2.631 4
验证点 5	计算测量	1.541 5	2.030 1	2.706 4
	测量误差	0.057 0	0.072 5	0.075 1
	参考值	2.880 9	3.863 6	5.122 5
验证点 6	计算测量	2.855 0	3.827 4	5.072 2
	测量误差	0.025 9	0.036 2	0.050 3

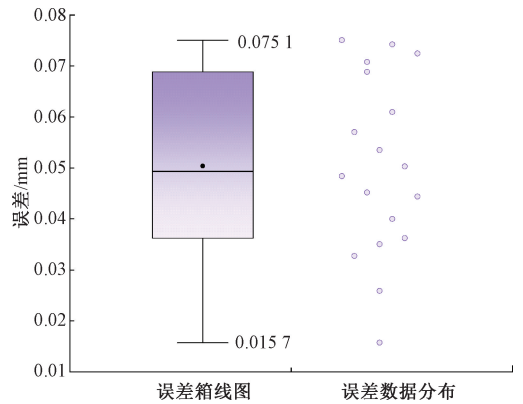


图6 航空壁板柔性装配定位目标在线测量误差统计  
Fig. 6 Error statistics of online measurement for positioning targets in flexible assembly of aircraft wall panels

分析实验结果可得,所提方法能够准确的计算定位器全局位移状态,即壁板的定位目标,其趋势与实际测量结果完全一致,计算测量误差不超过  $75.1 \mu\text{m}$ ,且随着变形量的增大计算误差有轻微的下落趋势,这可能是由于双目摄影测量系统在捕捉较大变形量时测量相对误差有所降低导致的。同时,单次计算测量耗时仅需不超过  $0.005 \text{ s}$ ,满足了装配中壁板柔性装配壁板的定位目标在线测量所需的精度与实时性要求。

#### 4.2 壁板实时面形在线测量实验

接着,开展了壁板实时面形在线测量实验。在包含协作机器人和可重构吸盘阵列的缩比平尾壁板柔性装配执行机构上,开展了柔性装配过程中壁板实时面形在线测量实验,以验证所提计算测量方法的有效性。本实验中,缩比机翼壁板的材料为航空铝合金 AL-7075,实验平台、缩比壁板的边界条件设置如图7所示。首先,通过一个数值实验确定所提方法单元数量、测点数量及测点布局对计算测量误差的影响,以确定测量系统的具体设计方法。沿世界坐标系  $x$  轴均匀划分4个单元,并沿世界坐标系  $y$  轴分别划分6、8、10、12、14个单元,分别在壁板上划分出24、32、40、48和56个分析单元。此外,分别按照随机布局、均匀等距布局及应变敏感区域布局3类方法将12、24、32、40、48及56个传感器布置在分析单元的中心,当测点数量与单元数量相同时则所有单元中均布置传感器。按上述实验设置,共计形成50组实验组(传感器数量不能多于分析单元数量),以24个分析单元为例,其各测点布置情况如图8所示,需要说明的是,由于本实验工况下应变敏感区域靠近约束边界处,因此应变敏感区域布局时,测点均尽量布置在靠近约束边界的位置附近,其余情况原则同理,受篇幅限制不做图示说明。然后,以3个电机均运动  $31.75 \text{ mm}$  为加载条件,利用Abaqus软件仿真分析,获取各单元和测点设置情况下的

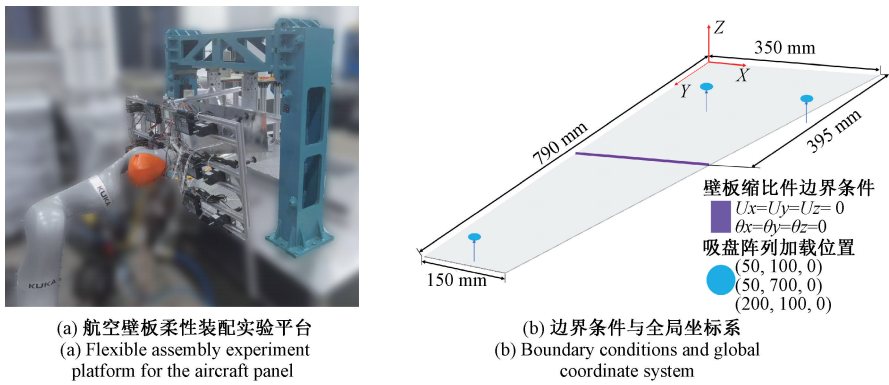


图 7 实验平台搭建与边界条件设置

Fig. 7 Experimental platform setup and boundary condition configuration

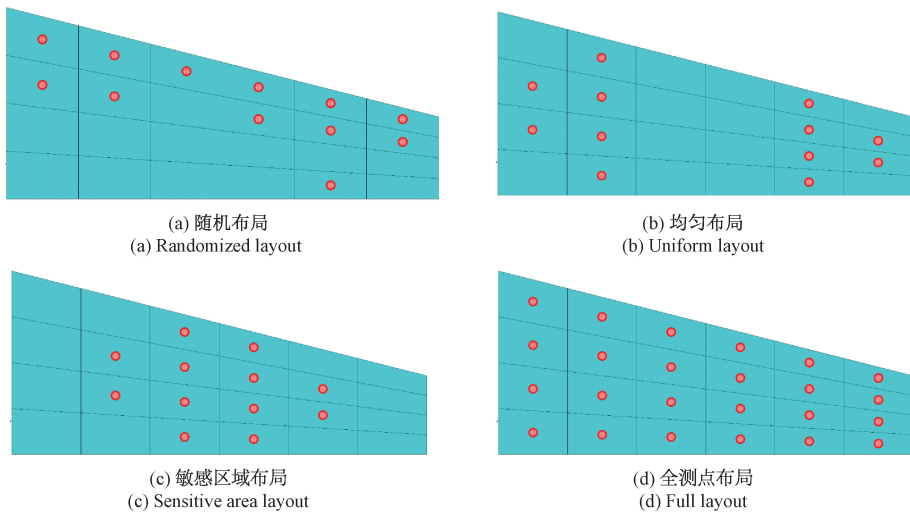


图 8 24 个分析单元、12 测点时的测点布局示意图

Fig. 8 Schematic layout of measurement points with 24 analysis elements and 12 measuring points

应变、位移情况,代入所提面形计算测量方法中分析各情况下的计算测量相对误差,以确定单元数量、测点数量及测点布局对测量误差的影响情况,并得到最佳的单元和测点布局设置,结果如图 9 所示。分析图 9 中曲线趋势可得,在应变敏感区域布置应变测点可使得测量误差显著降低,同时随着单元数量和测点数量的增加,测量误差总体呈现下降趋势。但值得注意的是,当测点数量小于单元数量时,测量误差往往会增大,在单元数量较少时该现象尤为明显。因此,为了兼顾精度与传感系统成本,应使用相对较少的单元并在尽可能多的单元中布置传感器。为了保证后续实测实验中的测量效果,选择仿真实验中平均相对误差<5%的布局设置方案,进而兼顾测量系统的布设成本,本实验最后选择采用 48 个分析单元、全部布设传感器的测量方案。

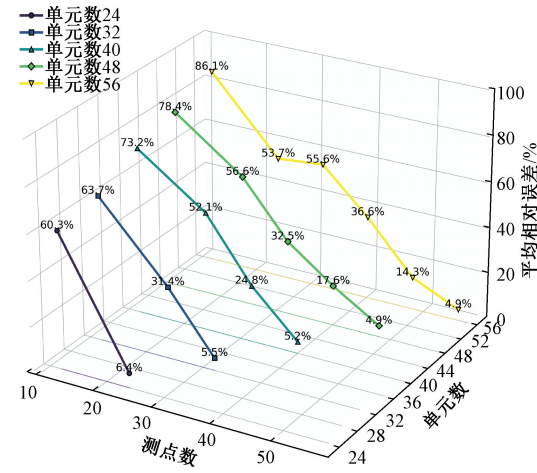
而后,以上述单元划分与测点布局开展实测实验,实

验中结构应变通过东华 DH3816N 应变测量模块采集(误差:±1 με),参考位移通过郑州辰维 MPS/CIM-3 单目测量系统获取,柔性装配执行机构通过吸盘阵列对缩比壁板施加的校形动作由 M1~M3 这三台电机的编码器测量并可通过电机控制软件直接读出。

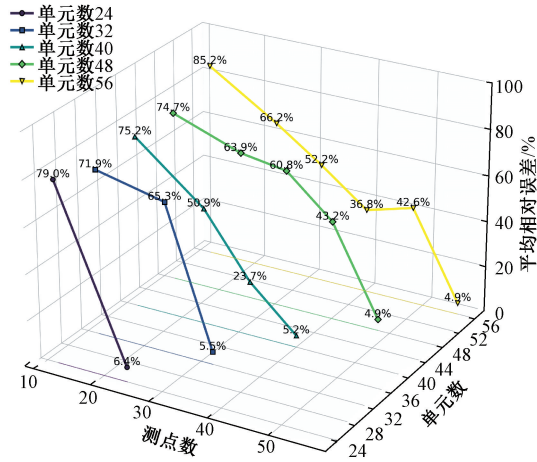
利用柔性执行末端按表 3 中的加载形式在缩比壁板上施加 5 组校形动作,通过所提方法计算壁板实时面形,并与相机测量结果比较以验证所提方法计算精度。1~3 组实验中,用于精度验证的参考测量点布置在靠近缩比壁板两个末端的 10 个节点处,而在 4、5 两组实验的加载方式下,非加载侧不产生位移,故转而将参考测量点布置在加载侧最末端一列单元的 10 个节点处,第 1 和第 4 组实验结果如图 10 和表 4 所示,全部实验面形实时感知相对误差统计结果如图 11 所示。

结果表明,所提方法可以准确的计算校形过程中的

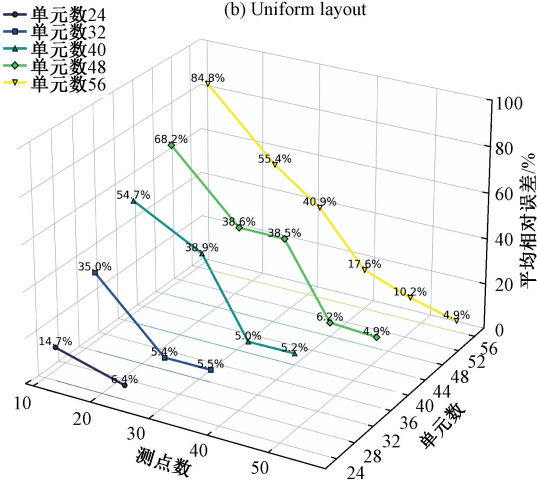
壁板面形变化趋势,验证点相对计算误差<18.11%,平均相对误差<9.99%,单组计算测量耗时仅0.01 s。从各组误差的分布趋势中可以发现,4、5两组误差较1~3组整体较小,这是由于本实验通过壁板上下沿的耳片实现壁板的定位,这一紧固方式与计算测量过程中设定的边界条件不完全一致,而4、5两组的加载方式下近似于单悬臂结构,计算过程中仅一侧受分析边界影响,而1~3组的工况下载荷工况更复杂,设定的固定边界对于变形状态的限制相对更加严格,这进一步放大了边界条件对分析结果的影响,致使计算误差被放大。未来将在边界条件对于壁板实时面形在线测量精度影响的方面开展进一步探索。



(a) 随机布局  
(a) Randomized layout

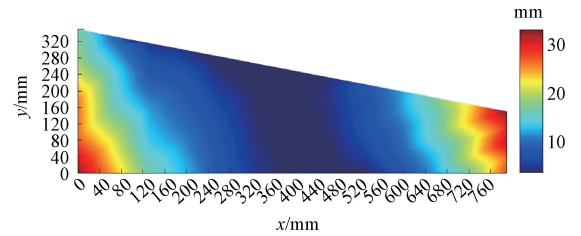


(b) 均匀布局  
(b) Uniform layout



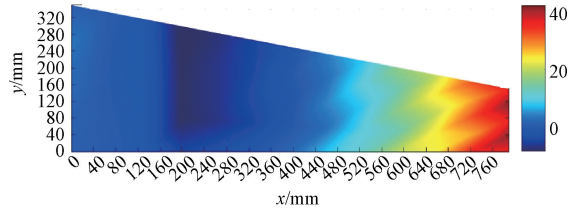
(c) 敏感区域布局  
(c) Sensitive area layout

图9 单元数量和测点布局对重构误差影响实验  
Fig. 9 Experimental study on the impact of element quantity and measurement point layout on reconstruction error



(a) 第1组结构实时面形计算测量结果

(a) Real-time surface shape calculation results of group 1st



(b) 第4组结构实时面形计算测量结果

(b) Real-time surface shape calculation results of group 4th

图10 第1和第4组壁板面形实时监测实验结果云图  
Fig. 10 Contour maps of real-time surface shape monitoring results for panel Groups 1<sup>st</sup> and 4<sup>th</sup>

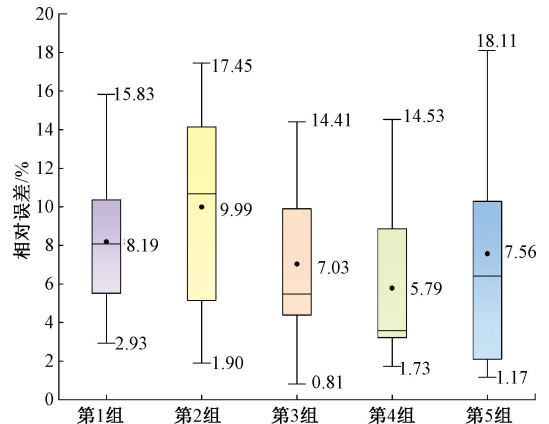


图11 壁板面形在线测量相对误差统计  
Fig. 11 Relative error statistics for online monitoring of the panel



表 3 加载方式  
Table 3 Load types in the experiment

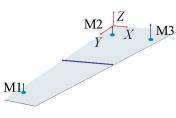
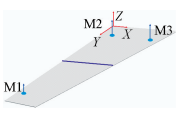
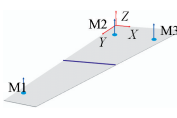
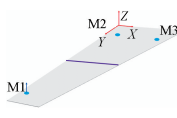
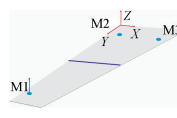
组别	1	2	3	4	5
加载位置					
加载数值	M1:19.05 mm M2:19.05 mm M3:31.75 mm	M1:19.05 mm M2:31.75 mm M3:19.05 mm	M1:31.75 mm M2:31.75 mm M3:31.75 mm	M1:19.05 mm M2:0.00 mm M3:0.00 mm	M1:31.75 mm M2:0.00 mm M3:0.00 mm

表 4 第 1 和第 4 组壁板面形实时监测实验结果

Table 4 Real-time monitoring experimental results of panel surface shape for Groups 1<sup>st</sup> and 4<sup>th</sup>

验证点编号	名称	第 1 组结果	第 4 组结果	验证点编号	名称	第 1 组结果	第 4 组结果
验证点 1	参考值/mm	26.927 9	26.597 9	验证点 6	参考值/mm	25.087 4	14.727 3
	计算测量/mm	25.430 4	25.604 0		计算测量/mm	25.822 4	16.284 8
	测量误差/mm	1.497 5	0.993 9		测量误差/mm	0.735 0	1.096 3
	相对误差/%	5.56	3.74		相对误差/%	2.92	7.44
验证点 2	参考值/mm	37.590 7	21.538 7	验证点 7	参考值/mm	23.626 0	24.055 4
	计算测量/mm	34.722 8	21.073 6		计算测量/mm	26.073 0	26.186 2
	测量误差/mm	2.867 9	0.465 1		测量误差/mm	2.447 0	2.130 8
	相对误差/%	7.62	2.16		相对误差/%	10.35	8.86
验证点 3	参考值/mm	25.886 3	25.778 8	验证点 8	参考值/mm	20.309 6	18.843 8
	计算测量/mm	23.679 6	28.227 3		计算测量/mm	19.188 7	19.469 6
	测量误差/mm	2.206 7	2.448 5		测量误差/mm	1.121 0	0.625 8
	相对误差/%	8.52	9.50		相对误差/%	5.51	3.32
验证点 4	参考值/mm	31.264 4	20.658 0	验证点 9	参考值/mm	22.318 6	23.068 2
	计算测量/mm	28.593 7	19.949 9		计算测量/mm	25.393 8	23.810 5
	测量误差/mm	2.670 7	0.708 1		测量误差/mm	3.075 2	0.742 3
	相对误差/%	8.54	3.43		相对误差/%	13.77	3.22
验证点 5	参考值/mm	24.789 2	24.964 1	验证点 10	参考值/mm	15.902 1	12.841 6
	计算测量/mm	28.714 3	24.532 7		计算测量/mm	15.394 9	15.641 5
	测量误差/mm	3.925 1	0.431 4		测量误差/mm	0.507 3	1.866 1
	相对误差/%	15.83	1.73		相对误差/%	3.18	14.53

## 5 结 论

本研究针对机翼、平尾等大型飞机核心承力部件壁板柔性装配过程中,壁板定位目标与实时面形等关键形位参量的在线测量难题,提出了一种关键形位参量计算测量方法,通过稀疏可测数据与物理解析模型融合,实现了壁板柔性装配中壁板定位目标与实时面形信息等直接测量不可达形位参量的在线测量。首先,提出了模态叠

加的壁板定位目标计算测量方法,结合双目视觉系统测量的可见区域稀疏点位移与基准零组件定位工装模态振型物理模型,实现了壁板定位目标的在线测量;然后,提出了几何方程约束的壁板面形计算测量方法,以结构位移-应变几何方程关联为约束,结合离散应变测量,实现了壁板面形的在线测量;最后,为了验证所提方法的有效性,搭建了飞机平尾壁板柔性装配缩比实验平台,开展了形位参量在线测量实验,结果表明所提方法壁板定位目标在线测量误差 < 75.1 μm,实时面形在线测量误

差<18.11%, 单次计算测量耗时分别不超过 0.005 和 0.01 s。为航空壁板柔性装配中关键形位参数的在线测量提供了技术支撑, 推动了柔性航空装配技术升级。

## 参考文献

- [1] SUN CH ZH, CHEN D Y, LI CH T, et al. A novel constrained optimization-build method for precision assembly of aircraft engine [J]. *Assembly Automation*, 2019, 40(6): 869-879.
- [2] 季青松, 陈军, 范斌, 等. 大型飞机自动化装配技术的应用与发展 [J]. *航空制造技术*, 2014(Z1): 75-78.
- JI Q S, CHEN J, FAN B, et al. Application and development of automatic assembly technology for large aircraft digital assembly technology for large aircraft [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(Z1): 75-78.
- [3] FAN W, ZHENG L Y, JI W, et al. A machining accuracy informed adaptive positioning method for finish machining of assembly interfaces of large-scale aircraft components [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102021.
- [4] GAI Y H, ZHANG J W, GUO J M, et al. Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly [J]. *Measurement*, 2020, 165: 108144.
- [5] RAMIREZ J, WOLLNACK J. Flexible automated assembly systems for large CFRP-structures [J]. *Procedia Technology*, 2014, 15: 447-455.
- [6] SCHWAKE K, WULFSBERG J. Robot-based system for handling of aircraft shell parts [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 23: 104-109.
- [7] VALENCIA D, WOLLNACK J, KAMATH S, et al. Multi-camera metrology system for shape and position correction of large fuselage components in aircraft assembly [C]. *International Conference on System-Integrated Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 194-204.
- [8] MARTIN O C, MUELANER J E, TOMLINSON D, et al. The metrology enhanced tooling for aerospace (META) framework [C]. *36th International MATADOR Conference*, 2010: 363-366.
- [9] MAROPOULOS P G, MUELANER J E, SUMMERS M D, et al. A new paradigm in large-scale assembly-research priorities in measurement assisted assembly [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70: 621-633.
- [10] 邱启帆, 王博, 张佳, 等. 面向激光跟踪仪跟踪恢复的伺服运动角度计算方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(7): 93-100.
- QIU Q F, WANG B, ZHANG J, et al. Calculation method of servo motion angle for laser tracker tracking recovery [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(7): 93-100.
- [11] 王巍, 刘焘. 基于数字化测量技术工装杯锥系统研究 [J]. *机械工程师*, 2024(1): 5-9, 14.
- WANG W, LIU T. Research on the tooling cup & cone system based on digital measurement technology [J]. *Mechanical Engineer*, 2024(1): 5-9, 14.
- [12] 王巍, 高雪松, 俞鸿均, 等. 基于关键测量特性的飞机装配工装在线检测 [J]. *制造业自动化*, 2016, 38(5): 107-110.
- WANG W, GAO X S, YU H J, et al. Aircraft assembly tooling on-line detection based on key measurement characteristics [J]. *Manufacturing Automation*, 2016, 38(5): 107-110.
- [13] 秦兆君, 郑联语, 张宏博, 等. 可重构柔性型架的智能装调与监测系统开发及应用 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(17): 72-79.
- QIN ZH J, ZHENG L Y, ZHANG H B, et al. Development of smart assembly and monitoring system for reconfigurable flexible tooling [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(17): 72-79.
- [14] QIN ZH J, LU Y Q, ZHANG H B, et al. A reconfigurable jig assistant assembly system based on wearable devices [C]. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84263: V002T07A005.
- [15] TUO H L, WU T, LU ZH X, et al. Study of impact damage on composite laminates induced by strip impactor using DIC and infrared thermography [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 176: 109288.
- [16] 罗久飞, 邱广, 张毅, 等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 240-247.
- LUO J F, QIU G, ZHANG Y, et al. Research on speeded up robust feature binocular vision matching algorithm based on adaptive double threshold [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 240-247.
- [17] FENG G Y, LIU Y, SHI W L, et al. Binocular camera-based visual localization with optimized keypoint selection and multi-epipolar constraints [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2024, 36(10): 102228.
- [18] XU S X, DONG Y CH, WANG H T, et al. Bifocal-binocular visual SLAM system for repetitive large-scale

- environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-15.
- [19] CHEN CH H, WANG B, LU C X, et al. Deep learning for visual localization and mapping: A survey[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024, 35(12): 17000-17020.
- [20] QU Z X, LI L, JIN W Q, et al. Real-time binocular visual localization system based on the improved BNet stereo matching framework[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2024, 41(3): 500-509.
- [21] WANG Y, LIU Y P, XIE Q, et al. Density-invariant registration of multiple scans for aircraft measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-15.
- [22] CHEN Y, JIANG W S, LUO Z, et al. A novel 3D reconstruction method with a binocular-line laser system[J]. Measurement, 2024, 227: 114238.
- [23] JIANG H ZH, WANG Q, ZHAO H J, et al. High-precision composite 3D shape measurement of aeroengine blade based on parallel single-pixel imaging and high-dynamic range N-step fringe projection profilometry[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110085.
- [24] LIU Y, ZHOU F Q, GUO ZH SH, et al. Pipeline inner surface 3D vision measuring system based on robot equipped with multi-directional structured-light sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2025, DOI:10. 1088/1361-6501/add610.
- [25] WANG R Y, LI D H, ZHENG W X, et al. Vision ray model based stereo deflectometry for the measurement of the specular surface [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172: 107831.
- [26] CHENG Y Y, SU Z Y, ZHANG J. Mode shape-aided cable force estimation of a double-hanger system using a vision-based monitoring method [J]. Measurement, 2024, 227: 114214.
- [27] XU Y, ZHANG J. UAV-based bridge geometric shape measurement using automatic bridge component detection and distributed multi-view reconstruction[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104376.
- [28] 巢渊, 曹震, 杜帅帅, 等. 大尺寸圆形零部件尺寸高精度视觉测量方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 138-150.  
CHAO Y, CAO ZH, DU SH SH, et al. High-precision visual measurement method for large-size circular parts[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 138-150.
- [29] 张诗婧, 莫绪涛, 董杨林, 等. 球面折反射成像的内螺纹螺距视觉测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 211-220.
- ZHANG SH J, MO X T, DONG Y L, et al. Spherical catadioptric imaging visual measurement system for internal thread pitch[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 211-220.
- [30] SHANG H, LIU CH Y, WANG R J. Measurement methods of 3D shape of large-scale complex surfaces based on computer vision: A review[J]. Measurement, 2022, 197: 111302.
- [31] TORRIELLI A, GIUSTI A, BRUSCO S, et al. The contribution of higher order modes in the dynamic response of slender vertical structures with application to wind turbine towers[J]. Engineering Structures, 2024, 308: 117886.
- [32] BOUTAGOUGA D. A review on membrane finite elements with drilling degree of freedom[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(4): 3049-3065.

## 作者简介



陈启航,2020年于大连理工大学获得学士学位,现为大连理工大学博士研究生,主要研究方向为航空航天大型组部件智能制造中的多参量实时感知技术。

E-mail: Qihangchen@mail.dlut.edu.cn

**Chen Qihang** received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2020 and is currently a Ph.D. candidate at the same university. His research focuses on multi-parameter real-time sensing technologies in the intelligent manufacturing of large-scale aerospace components.



刘巍(通信作者),2001年于华北电力大学获得学士学位,2003年于大连理工大学获得硕士学位,2007年于大连理工大学获得博士学位,现为大连理工大学教授,国家杰青,任大连理工大学机械工程学院院长、党委副书记,主要研究方向为复杂环境下几何量与物理量的精密测控与基于多传感器融合的智能制造。

E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

**Liu Wei** (corresponding author) received his B.Sc. degree from North China Electric Power University in 2001, received his M.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2003, received his Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 2007. He is currently a professor at Dalian University of Technology, serving as dean and deputy party secretary of the School of Mechanical Engineering. He is a recipient of the national science fund for distinguished young scholars. His research focuses on precision measurement and control of geometric and physical quantities in complex environments.