

文章编号 1004-924X(2026)19-2984-14

单相机三维数字图像相关的热扰动补偿

宋浩林¹, 陈萌萌¹, 杨乐义¹, 王永红^{1,2}, 李骏睿^{1,2*}

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 安徽省测量理论与精密仪器重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对高温环境下空气折射率波动在 DIC 测量中引入伪位移、现有单相机补偿方法局限于二维 DIC、而传统双相机三维 DIC 在受限观测窗口下易受相机布置与外参稳定性影响的问题,提出一种单相机三维位移重建与热扰动补偿方法。该方法基于单相机双棱镜伪立体 DIC 系统构建左右虚拟视角,实现三维位移重建;同时引入双通道共轴投影散斑热扰动补偿思想,以蓝色投影散斑通道表征热扰动位移场,以绿色喷涂散斑通道获取真实结构位移与热扰动叠加后的复合位移场,并通过两通道位移差分实现补偿。实验结果表明,纯扰动条件下两通道热扰动位移场具有良好一致性, Pearson 相关系数为 0.989 870。含热扰动刚体位移实验中,三维变形矢量模均值的全加载过程均方根误差经补偿由 0.074 356 mm 降至 0.028 773 mm;高温炉加载实验中, x 方向位移的全加载过程均方根误差由 0.085 303 mm 降至 0.017 240 mm。实验结果验证了所提方法对高温热扰动误差的有效补偿能力,为受限高温环境下非接触全场三维变形测量提供了可行技术途径。

关键词:数字图像相关;单相机三维测量;热扰动补偿;投影散斑;双通道共轴

中图分类号:O348;TP391.41 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263419.2984 **CSTR:**32169.14.OPE.20263419.2984

Thermal disturbance compensation for single-camera three-dimensional digital image correlation

SONG Haolin¹, CHEN Mengmeng¹, YANG Leyi¹, WANG Yonghong^{1,2}, LI Junrui^{1,2*}

(1. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: lijunrui@hfut.edu.cn

Abstract: Air refractive index fluctuations in high-temperature environments can introduce spurious displacements into digital image correlation (DIC) measurements. Existing single-camera thermal disturbance compensation methods are largely restricted to two-dimensional DIC, whereas conventional dual-camera three-dimensional (3D) DIC is constrained by camera placement and extrinsic parameter stability when optical access is limited. To address these limitations, a single-camera method for 3D displacement

收稿日期:2026-07-06;修订日期:2026-07-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52205562, No. 52375536);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. JZ2025HG TB0197)

reconstruction and thermal disturbance compensation is proposed. Left and right virtual views are generated using a single-camera, dual-prism pseudo-stereo DIC system to reconstruct 3D displacements. A dual-channel coaxial projected-speckle compensation scheme is introduced: the blue projected-speckle channel is used to characterize the thermal disturbance displacement field, while the green sprayed-speckle channel captures the combined structural displacement and thermal disturbance. Compensation is achieved by subtracting the displacement fields obtained from the two channels. Under pure thermal disturbance conditions, strong agreement is observed between the measured displacement fields, with a Pearson correlation coefficient of 0.989 870. In a rigid-body displacement experiment subjected to thermal disturbance, the root-mean-square error (RMSE) of the mean 3D deformation vector magnitude over the entire loading process is reduced from 0.074 356 to 0.028 773 mm after compensation. In a high-temperature furnace experiment, the RMSE of the x -direction displacement over the entire loading process is reduced from 0.085 303 to 0.017 240 mm. These results demonstrate the effectiveness of the proposed method in mitigating thermal disturbance errors and establish a feasible approach to non-contact, full-field 3D deformation measurement in high-temperature environments with restricted optical access.

Key words: digital image correlation; single-camera 3D measurement; thermal disturbance compensation; projected speckle; dual-channel coaxial configuration

1 引 言

高温服役结构的变形测量是航空航天、能源动力及高温材料评价中的重要实验需求。以高超声速飞行器热防护结构、发动机热端部件及高温炉内加载试件为代表的对象,在服役或试验过程中往往同时承受机械载荷和强热载荷,结构表面温度可达到数百摄氏度甚至 1 000 °C 以上。此时材料会产生热膨胀、热应力集中、蠕变及热-力耦合变形等复杂响应,若不能获得可靠的全场位移信息,将难以准确评价材料性能和结构安全。因此,发展适用于高温环境的非接触、高精度、全场三维变形测量方法具有重要意义。

传统高温变形测量方法主要包括高温应变片、高温引伸计和光纤光栅等接触式技术,但其在超高温或强热流环境下容易受到耐温能力、安装方式、测点数量和接触扰动等因素限制,难以满足复杂结构全场测量需求。DIC 技术通过跟踪试件表面散斑图像在变形前后的灰度相关性获取位移场,具有非接触、全场、装置相对简洁和精度较高等优点,已广泛用于材料与结构变形测量^[1-2]。其中,三维 DIC 能够同时重建面内与面外位移,较二维 DIC 更适合高温加载中不可避免的翘曲、离面运动和非均匀变形测量^[2-3]。

然而,热扰动会显著影响高温 DIC 的测量精

度。高温试件、加热炉或火焰热源会在观测光路中形成不稳定的温度梯度,使空气折射率随时间和空间波动,进而导致光线偏折和散斑图像局部漂移。Jones 等^[4]指出,热浪会在 DIC 位移结果中引入明显伪位移;Berny 等^[5]进一步表明,热扰动造成的图像随机漂移和局部畸变可能与真实结构变形在时空尺度上相互叠加。在高温 DIC 计算中,相关算法得到的位移往往同时包含结构真实位移和由折射率波动引起的表观位移,若不进行有效补偿,将直接降低测量精度,严重时甚至导致相关匹配失效。

针对上述问题,已有研究从实验环境优化、光学抑制和算法补偿等方面开展了大量工作。例如,短波照明、光学滤波、隔热结构和散斑设计可在一定程度上削弱高温辐射及热对流对成像的干扰^[6-8];背景导向施里伦、参考样本补偿、多光谱 DIC、激光散斑结合 RANSAC 平滑及深度学习等方法则尝试从图像或位移场中估计并修正热浪畸变^[9-12]。这些方法提高了高温 DIC 的可用性,但仍存在两个方面的不足:一方面,部分方法依赖额外参考板、辅助光路或复杂模型,对测试空间、观测窗口和实验环境要求较高;另一方面,许多补偿策略主要面向二维 DIC 或单视场位移测量,难以直接满足高温条件下三维位移重建与热扰动补偿同步实现的需求。

在三维测量场景中,传统双相机三维 DIC 虽然能够获得完整三维位移场,但在高温炉、封闭腔体或狭小观测窗口条件下,两台相机的布置、视场重叠、同步触发和标定维护往往受到限制。更重要的是,高温环境中的热辐射、热流场和设备温升可能引起相机姿态、支架结构或双目外参的微小漂移,从而增加立体重建误差^[13]。因此,高温 DIC 测量系统设计的出发点不只是“需要补偿热扰动”,还包括在受限测试场合中降低多相机系统对空间、同步和外参稳定性的依赖。由于现有单相机热扰动补偿研究多停留在二维 DIC 或单视场补偿层面,发展单相机三维 DIC 热扰动补偿技术成为高温全场测量中的必要方向。

多通道散斑测量为热扰动补偿提供了新的思路。其基本思想是构建两个具有不同物理含义的成像通道:一个通道用于记录主要由空气折射率波动引起的热扰动位移场,另一个通道用于记录包含真实结构变形与热扰动的复合位移场,并通过两通道结果的差分实现扰动补偿。Wang 等^[14]提出的投影散斑方法和 Pan 等^[15]发展的多通道提取与校正方法表明,利用投影散斑表征热扰动、利用表面散斑表征真实结构变形与热扰动叠加后的复合位移具有可行性;此外,彩色多通道 DIC 已被用于多层结构应变场的同步测量,说明通过颜色通道分离不同物理含义的散斑信息和变形信息具有可行性^[16]。但补偿效果依赖于两个通道经历相同或高度一致的热扰动路径;若采用侧向投影、非共轴光路或不同相机采集,不同通道在热流场中的传播路径差异会削弱扰动分量的一致性,从而影响差分补偿精度。

针对上述问题,本课题组前期提出了一种双通道共轴投影散斑高温 DIC 热扰动补偿方法^[17]。该方法利用蓝色激光经毛玻璃形成正面投影散斑,用于记录主要由空气折射率波动引起的纯热扰动位移场;同时利用绿色照明下的表面喷涂散斑记录结构真实位移与热扰动叠加的复合位移场。两类散斑沿同一观测光轴传播,并由同一彩色相机同步采集,再通过光谱分离和通道差分实现热扰动补偿。该研究验证了双通道共轴光路能够提高两通道热扰动分量的一致性,为高温 DIC 测量中的热扰动补偿提供了有效方法。

然而,上述双通道共轴热扰动补偿方法主要

建立在二维 DIC 测量框架下,其补偿对象为图像平面内的二维位移场。对于可能存在面外位移或空间变形的高温构件,仅基于二维图像平面位移的测量结果在表征三维变形特征时具有一定局限。因此,如何将双通道共轴热扰动补偿思想由二维 DIC 测量拓展至三维 DIC 测量框架,是提升受限高温环境下全场三维变形测量可靠性与精度需要重点研究的问题。另一方面,单相机伪立体 DIC 可通过双棱镜或单彩色相机伪立体成像方式将一台相机的视场等效分裂为多个虚拟视角,可在紧凑光路中实现类似双目系统的三维测量^[3,18-19],并天然具有同步采集、结构简洁和适应有限观测窗口的优势。由此,将双通道共轴热扰动补偿思想扩展到单相机双棱镜伪立体三维 DIC 系统中,成为同时解决高温热扰动补偿、受限环境成像和三维位移重建问题的有效途径。

本文围绕上述需求,提出一种基于单相机双棱镜伪立体 DIC 系统的双通道共轴投影散斑热扰动补偿方法。将双通道共轴热扰动补偿思想扩展到单相机双棱镜伪立体三维 DIC 系统中,进而实现单相机条件下的三维位移重建与热扰动补偿。该系统利用双棱镜在单台彩色相机中形成左右虚拟视角,实现单相机三维 DIC;同时构建蓝色投影散斑通道和绿色喷涂散斑通道,前者用于表征纯热扰动位移场,后者用于获取包含真实结构位移与热扰动的复合位移场,并利用两通道共轴传播条件下热扰动分量的一致性进行差分补偿。

2 基本原理

2.1 单相机双棱镜伪立体三维 DIC 原理

三维 DIC 是一种基于散斑图像灰度匹配的非接触式全场测量方法,通过跟踪试件表面散斑在参考态与变形态之间的灰度相关关系,获得全场位移信息,并进一步实现三维形貌和三维位移场重建^[2,20]。与二维 DIC 相比,三维 DIC 通过多视角成像可同时获取面内与面外位移,适用于存在翘曲、离面运动或非均匀变形的复杂结构测量;近年来,单相机光学分视场和反射镜辅助多视角等方法也被用于复杂结构三维变形测量,进一步拓展了三维 DIC 在受限空间和复杂构件测量中的应用^[21-23]。

典型三维 DIC 系统首先利用两个视角获取同一空间点在不同图像中的对应像点,再结合立体视觉几何关系进行三维坐标重建^[18,22]。位移计算时,采用子区域灰度匹配方法确定散斑在参考态与变形态之间的对应位置,并通过三角测量获得空间点三维坐标;随后对参考态和变形态的三维坐标进行差分,即可得到全场三维位移信息。

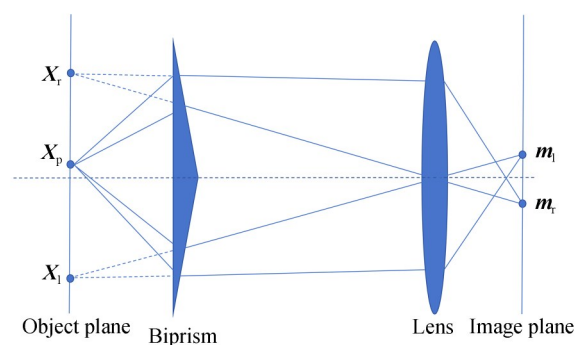
本文采用的单相机双棱镜伪立体三维 DIC 系统仍遵循上述立体 DIC 的基本重建思想,其区别在于不再使用两台独立相机获取双视角图像,而是通过双棱镜在单台相机中形成左右两个虚拟视角,从而在单相机条件下实现伪立体成像。

单相机立体视觉测量通常通过在光学系统中引入反射镜、衍射光栅或棱镜等元件,将单个相机的视场分裂为多个虚拟视角,从而实现三维测量^[3]。其中,基于双棱镜的单相机伪立体测量系统结构相对紧凑,能够在有限观测窗口条件下形成等效双目视场,适合本文高温受限测试场景。如图 1 所示,该系统主要由双棱镜、成像镜头和 CCD 相机组成。双棱镜位于被测物体与镜头之间,其两个倾斜面会使来自物体的光线发生折射,从而形成两个不同方向的观察视角。

图 1(a)展示了双棱镜伪立体成像中的虚拟点概念。真实三维点 X_p 发出的光经双棱镜两个倾斜面折射后,形成两个方向不同的光束,相机镜头可将其等效看作来自左右两个虚拟点 X_l 和 X_r 。随后,这两个虚拟点分别投影到图像平面上的像点 m_l 和 m_r ,二者之间的像素距离即为视差,其大小与物体点深度 Z 相关^[18]。

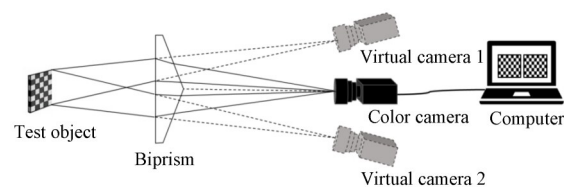
图 1(b)展示了虚拟相机概念。双棱镜产生的两个观察方向可等效为左、右两个虚拟相机视角,两虚拟相机具有相同的相机内参数,其相对外参数由双棱镜楔角、折射率以及相机—棱镜—被测物之间的几何关系共同决定。虽然实际系统只使用一台 CCD 相机,但经棱镜折射形成的两个等效光学路径使系统在几何上可等效为双目立体视觉系统^[18-19]。因此,可利用经典立体视觉三角测量原理,根据左右虚拟视角之间的视差恢复物体点三维坐标。

在实际测量过程中,首先将单幅图像分割为左、右两个虚拟视角区域;然后在两个视角之



(a) 双棱镜虚拟点

(a) Schematic diagram of the biprism virtual-point concept



(b) 虚拟相机

(b) Schematic diagram of the virtual-camera concept

图 1 单相机立体视觉测量系统

Fig. 1 Single-camera three-dimensional visual measurement system

间进行 DIC 相关匹配,获得对应像点关系;最后结合相机成像模型和双棱镜折射模型,建立像点坐标与物体空间坐标之间的映射关系,从而实现单相机条件下的三维形貌重建和位移计算^[18]。

2.2 双通道共轴投影散斑分离机制

在高温 DIC 测量中,空气温度梯度会导致介质折射率发生时空波动,使观测光线产生偏折并引起散斑图像额外漂移^[4-5,24]。这种由光路扰动造成的图像位移并非试件真实运动,而是热扰动引入的伪位移。当采用传统单通道散斑测量时,DIC 相关计算得到的位移结果同时包含结构真实位移与热扰动误差,难以直接分离。

为实现热扰动与真实变形的分离,本文采用双通道共轴投影散斑测量机制。该机制借鉴投影散斑热扰动补偿和多通道提取校正思想^[14-15],构建两组具有不同物理含义的散斑信息:蓝色激光正面投影散斑不与试件表面发生机械耦合,其成像变化主要来源于高温气流导致的折射率扰动,可用于表征纯热扰动位移场;绿色照明下的

喷涂散斑与试件表面同步运动,其成像位移同时包含结构真实位移和热扰动分量,形成复合位移场。

双通道分离的实现依赖于波长和颜色通道的区分。根据普朗克热辐射定律,高温物体的热辐射能量随温度升高逐渐增强,并且在可见光波段内长波区域的辐射干扰更为显著。对于高温实验环境,红色通道对应的光谱波长较长,容易与高温热辐射以及加热装置产生的光干扰发生重叠,从而导致图像灰度升高甚至局部过曝,影响散斑图像的的稳定采集与相关计算精度。

图 2 给出了本文所用 3CCD 相机的 RGB 三通道光谱响应特性。可以看出,蓝色通道主要响应约 400~500 nm 的短波区域,绿色通道主要响应约 500~590 nm 的中短波区域,而红色通道在约 590~700 nm 的长波区域具有较强响应。由于高温热辐射在可见光范围内对长波红光区域的影响更明显,红色通道更容易受到热辐射背景光的干扰;相比之下,蓝色通道和绿色通道的响应波段较短,与高温热辐射干扰区域的重叠程度较低,能够有效减小热辐射和加热光源对散斑图像的影响。因此,本文选取蓝色通道和绿色通道作为双通道图像采集通道,其中蓝色通道用于匹配投影散斑,绿色通道用于匹配喷涂散斑。该通道选择方式既保证了两类散斑图案在光谱上的有效分离,又提高了高温环境下散斑图像采集的抗热辐射干扰能力。

当系统同时获取蓝、绿两类散斑信息时,不

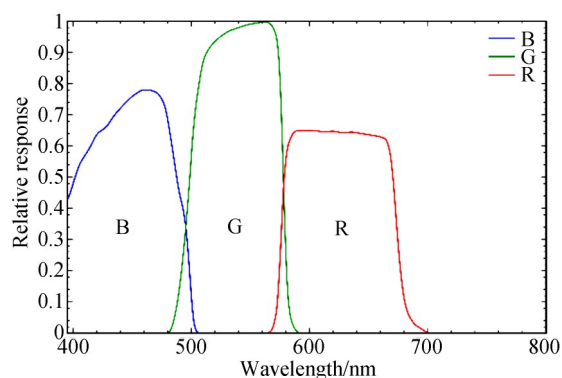


图 2 3CCD 相机 RGB 三通道的光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response curves of RGB channels of 3CCD camera

同波段的散斑图像主要分布在对应的 RGB 通道中。通过对彩色图像进行通道分离,可分别提取蓝色投影散斑图像和绿色喷涂散斑图像,并对两组图像采用相同的 DIC 参数进行相关计算,从而获得热扰动位移场和复合位移场,为后续差分补偿提供数据基础。

2.3 热扰动差分补偿模型

在完成双通道图像分离与 DIC 计算后,可分别获得两组位移场:热扰动位移场,主要反映空气折射率变化引起的光路扰动;复合位移场同时包含结构真实位移和热扰动附加位移。基于两通道共轴传播条件下扰动分量一致的假设,可建立热扰动差分补偿模型^[14-15]。在同时存在结构真实变形和空气折射率扰动时,图像中任一像素点的观测位置可表示为:

$$x' = x + u(x) + d(x), \quad (1)$$

其中: x 为参考状态下的像素坐标, $u(x)$ 为由试件真实变形引起的位移分量, $d(x)$ 为光线传播过程中由于空气折射率非均匀性导致的表观位移,即热扰动分量。

对于双通道测量系统,蓝色激光投影散斑不与试件表面发生机械耦合,其位移仅来源于热扰动,因此可表示为:

$$x'_1 = x + d(x). \quad (2)$$

而喷涂散斑与试件表面刚性连接,其观测位移同时包含真实位移与热扰动分量:

$$x'_2 = x + u(x) + d(x). \quad (3)$$

由于两通道采用共轴设计,且通过同一相机同步采集,两类散斑在传播过程中经历相同的热流场扰动,故其热扰动分量 $d(x)$ 在空间上具有一致性。对两通道位移进行差分运算可得:

$$u(x) = x'_2 - x'_1. \quad (4)$$

由式(4)可知,在两通道热扰动分量一致的前提下,对复合位移场与热扰动位移场进行差分即可补偿热扰动分量,获得主要由结构真实变形引起的位移场。该模型成立的关键前提是两通道具有共轴传播路径并由同一相机同步采集;若两通道光路不一致或采集不同步,则热扰动分量的一致性会受到破坏,进而影响补偿效果。

2.4 双通道三维位移重建流程

与二维 DIC 中直接在图像平面进行位移补偿不同,单相机双棱镜三维 DIC 的热扰动补偿同

时涉及通道分离、左右虚拟视角匹配和三维重建三个过程。对于二维 DIC,由于测量结果本身位于同一图像平面,通常可在两通道相关匹配后对二维位移场进行相减;而在三维 DIC 中,左右视角匹配、立体标定和三角测量会把图像坐标映射到空间坐标,若先在二维图像位移层面进行通道相减,再参与三维重建,容易使通道间散斑纹理差异、左右虚拟视角差异和重建几何误差相互耦合。因此,本文不采用“二维图像先补偿、再三维重构”的处理路径,而采用“通道分别三维重构、再在三维位移场层面相减”的路径。具体而言,彩色相机在同一曝光时刻获得同时包含蓝色投影散斑和绿色喷涂散斑的单幅图像。首先对该图像进行 RGB 通道分离,得到蓝通道图像 B 和绿通道图像 G;随后利用双棱镜形成的伪立体成像关系,将每一通道进一步分割为左、右两个虚拟视角,即 B_l, B_r 和 G_l, G_r 。对于每一组左右视角图像,均按照单相机双棱镜伪立体三维 DIC 流程进行立体匹配、标定映射、三角测量以及参考态与变形态坐标差分,从而分别获得两通道的三维位移场^[2-3,18-23]。

在完成两通道三维重构后,需要将蓝色投影散斑通道重建得到的三维热扰动位移场和绿色喷涂散斑通道重建得到的三维复合位移场统一到同一测量区域与同一空间坐标系中。实际计算时,可通过相同 ROI 网格设置获得对应测点;当两通道有效计算点不完全重合时,则通过空间插值或邻近点映射建立一一对应关系。完成三维位移场对应后,再对每个对应测点的三维位移分量进行逐点差分。

由此得到补偿后的结构真实三维位移场。上述流程可概括为:RGB 通道分离—左右虚拟视角分割—蓝/绿通道分别单相机双棱镜三维 DIC 重构—三维位移场空间对应—通道间逐点差分补偿。该流程的关键在于,热扰动不是在二维图像上被提前扣除,而是在两个通道各自完成三维重构之后,以空间三维位移场的形式进行补偿。这样既保留了单相机双棱镜伪立体系统的三维测量几何,又将双通道共轴投影散斑热扰动补偿思想从二维位移补偿扩展到三维 DIC 输出层面,构成本文区别于已有单相机二维热扰动补偿方法的核心处理方式。

3 实验与结果分析

实验系统主要由单台彩色相机、双棱镜分光组件及双通道散斑光源构成。成像系统采用型号为 AP_3200T 的彩色相机及焦距为 75 mm 的镜头,通过双棱镜在单幅图像中形成左右两个虚拟视角,实现单相机立体视觉测量。双棱镜选用石英材料,以保证在高温环境下的热稳定性,其楔角参数通过标定确定。

为实现热扰动与真实位移信息的分离,构建了基于光谱分离的双通道散斑测量系统。蓝色通道采用波长约 450 nm 的激光经毛玻璃散射后形成投影散斑,用于表征仅由空气折射率变化引起的热扰动位移场;绿色通道采用波长为 520~530 nm 的 LED 光源照明试件表面的喷涂散斑,用于获取包含真实结构变形与热扰动的复合位移场。两类散斑通过共轴光路进入同一相机,实现同步采集与通道分离。

实验系统原理如图 3 所示,系统光路由蓝色激光投影光路与绿色表面散斑成像光路共同构成,并最终通过双棱镜后进入单台彩色相机实现同步采集。其中相机与双棱镜的相对位置采用激光辅助对准方法进行光路校准,使用远距离激光建立一条水平基准光束,使其与镜头光轴重合;随后通过调节棱镜姿态,使棱镜反射光与入射光重合,从而保证光轴满足理论条件。绿色 LED 光源对试件表面的人工喷涂散斑进行照明。试件表面预先喷涂有蓝色底色和灰色斑点形成的随机散斑图案,该散斑与试件表面刚性连接,当试件在拉伸试验机作用下发生变形时,表面散斑将随试件表面同步运动。经绿色 LED 照明后,散斑反射光从试件表面返回,并沿观测方向传播至分光器位置。投射部分的光线经双棱镜折射后形成左右两个虚拟视角的图像,由相机完成图像记录。同时,蓝色激光器发出的激光首先通过扩束镜进行扩束,使光束直径增大并获得较均匀的照射区域,随后激光照射至毛玻璃片。毛玻璃片在随机散射作用下将入射激光转化为具有随机灰度分布特征的散斑场,该散斑场继续传播经过半透半反镜反射到试件表面区域,实现蓝色激光投影光路与绿色表面散斑成像光路共轴。

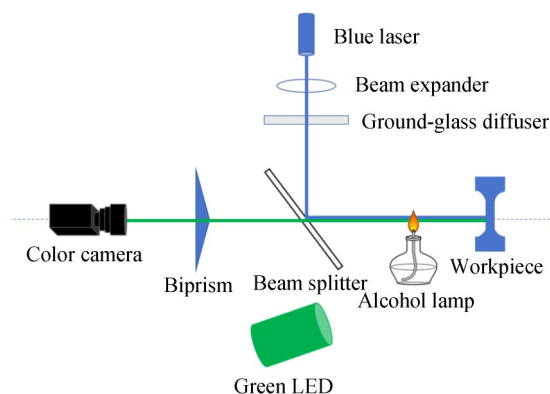


图3 单相机伪立体DIC实验系统原理

Fig. 3 Schematic diagram of single-camera pseudo-stereo DIC validation experimental system

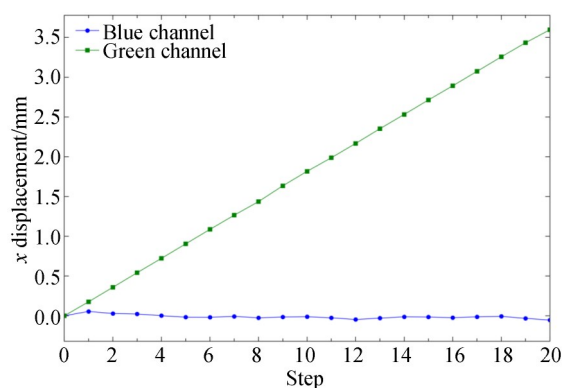
在实验过程中,系统同时开启蓝色激光投影散斑与绿色LED照明光源,相机在单次曝光中获得一对等效立体图像。图像采集完成后,需要沿图像中间分割线将单幅图像分离为左右两个子图像,每个子图像对应虚拟双目系统中的一个视角。利用标定板图像对左右子图进行立体标定,可获得虚拟双目系统的内参数与外参数,从而建立相机坐标系与空间坐标之间的几何关系,并在此基础上开展三维数字图像相关计算,得到全场位移信息。

为系统验证所提方法的有效性,分别从通道独立性、扰动一致性以及差分补偿效果三个层面对实验进行设计与分析。

3.1 双通道独立性验证

为了验证蓝、绿双通道位移信息的独立性,即当试件发生位移时,蓝色通道不产生与试件变形相关的位移输出,而绿色通道仅输出试件的真实变形位移,本文在无热扰动的常温环境下开展了一组刚体位移实验。实验过程中,试件按照0.2 mm/step的位移增量逐步加载,每个加载步采集一帧图像,并分别提取蓝色通道和绿色通道在各加载步下的 x 方向位移均值,绘制得到双通道 x 方向位移随加载步变化折线图,如图4所示。

由实验数据及折线图可以看出,在无热扰动的常温环境中,绿色通道的 x 方向位移随加载步数增加呈明显线性增长趋势,与试件所施加的真实位移变化趋势基本一致,说明绿色通道能够有效响应试件的实际变形位移。相比之下,蓝色通

图4 常温无热扰动下双通道 x 方向位移均值随加载步变化曲线Fig. 4 Variation of mean x -direction displacement in two channels with loading step at room temperature without thermal disturbance

道的 x 方向位移始终在0 mm附近小幅波动,其位移均值整体接近零,未随试件位移的增加而产生同步变化。前20组数据中,蓝色通道位移主要分布在-0.047 mm至0.055 mm内,波动幅值较小,表明蓝色通道子区几乎不随试件变形移动。

由此表明,在常温且无热扰动条件下,蓝色通道与绿色通道对试件位移的响应具有明显差异:绿色通道主要反映试件的真实变形位移,而蓝色通道基本保持稳定,仅存在微小随机波动。因此,两通道中同一子区的位移信息具有良好的独立性,蓝、绿通道之间不存在明显的交叉干扰。该实验结果验证了双通道位移解耦方法的有效性,为后续热扰动条件下的位移分离与温度补偿实验提供了基础。

3.2 纯热扰动一致性验证

为验证双通道差分模型成立的前提条件,即两通道在共轴条件下经历一致的热扰动分量,开展热扰动一致性验证实验。

实验中,试件保持静止状态,不施加任何机械加载,以排除真实结构位移的影响,仅保留由空气折射率波动引起的热扰动。采用酒精灯作为热源,在试件与相机之间形成稳定的热流场。系统同时开启蓝色激光投影散斑与绿色LED照明,利用同一相机同步采集双通道图像序列。对采集到的图像进行左右视场分割及RGB通道分离,分别提取蓝通道与绿通道散斑图像,并采用相同的数字图像相关参数进行位移计算,从而

分别获得两通道对应的表观位移场。由于试件未发生真实变形,理论上两通道测得的位移均应来源于热扰动,其空间分布应具有一致性。

图 5(a)与图 5(b)分别给出了蓝通道与绿通道的位移云图。可以看出,蓝色通道和绿色通道所得位移场在整体分布形态上具有高度一致性,均呈现出由左侧正位移区域向右侧负位移区域连续过渡的变化特征,且零值过渡带位置基本重合,说明两种颜色通道对整体位移场变化趋势的表征结果较为一致。同时,两通道云图中的局部扰动区域在空间位置和形态上也具有较好的对应关系,未观察到明显的局部错位或异常畸变,表明两通道对局部位移波动特征的捕捉结果较为吻合。

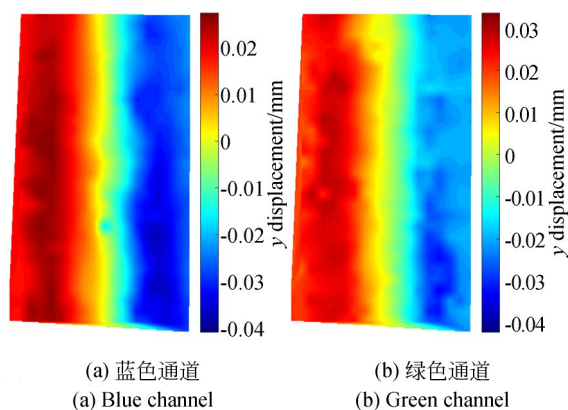


图 5 双通道 y 方向位移云图
Fig. 5 Y-direction displacement contour maps

为进一步定量评价绿色通道与蓝色通道方向位移结果的一致性,提取两组数据中相同测点的 y 方向位移值,并计算 Pearson 相关系数、平均绝对误差和均方根误差。结果表明,两通道位移数据的 Pearson 相关系数为 $R=0.989\ 870$,接近 1,说明绿色通道与蓝色通道所得 y 方向位移场具有较强的线性相关性和高度一致的空间分布特征。同时,两者的平均绝对误差为 $0.004\ 756\ \text{mm}$,均方根误差为 $0.005\ 802\ \text{mm}$,表明两通道位移结果之间的整体误差水平较低。

绿色通道与蓝色通道的差值云图如图 6 所示。该图进一步表明,两者差异整体较小,差值主要分布在零值附近,仅在局部区域存在轻微波动。其中,差值最大值为 $0.013\ 002\ \text{mm}$,最小值

为 $-0.006\ 295\ \text{mm}$,说明两通道所得 y 方向位移结果之间不存在明显的系统性偏差。

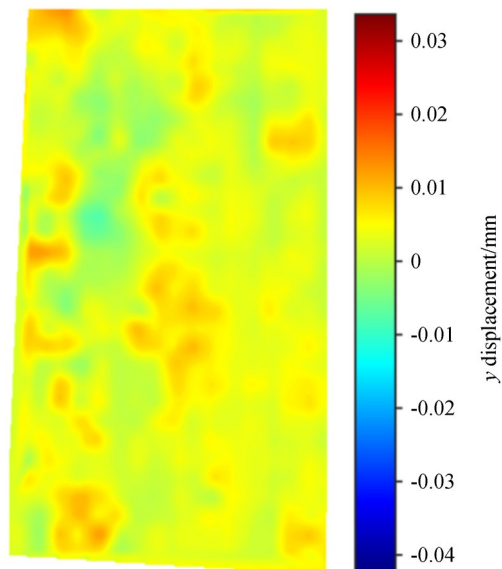


图 6 绿色通道减蓝色通道的 y 方向位移云图
Fig. 6 Contour map of y -direction displacement difference between green and blue channels

上述结果表明,在共轴光路设计下,蓝色投影散斑与绿色喷涂散斑在传播过程中经历相同的热流场扰动,其对应的热扰动位移分量具有良好一致性,从而为后续基于差分的热扰动补偿模型提供了可靠的实验依据。

3.3 刚体位移热扰动补偿验证

为了验证两通道位移场之间满足叠加关系,可通过对两通道位移场进行差分计算补偿热扰动,从而得到仅由结构变形引起的真实位移分布,实验采用酒精灯作为热扰动源,进行了一组含热扰动的刚体位移实验。

在无热扰动条件下,首先通过位移台驱动试件沿 y 方向进行逐步刚体位移加载,加载步长为 $0.1\ \text{mm/step}$,共采集 20 个加载步的图像序列。由于位移台存在一定误差,本文将无热扰动条件下计算得到的三维 DIC 位移结果作为参考组。随后,将试件恢复至初始位置,在保持其余条件不变的情况下点燃酒精灯,待燃烧稳定后,仍按 $0.1\ \text{mm/step}$ 的加载步长沿 y 方向进行刚体位移加载,并同步采集双通道图像序列。

通过 20 帧图片序列计算得到位移均值曲线,

如图7所示。由图可知,补偿前的位移曲线因热扰动干扰与真实线性特征偏差较大;补偿后的位移曲线平滑连续,与真实位移的线性分布高度吻合。

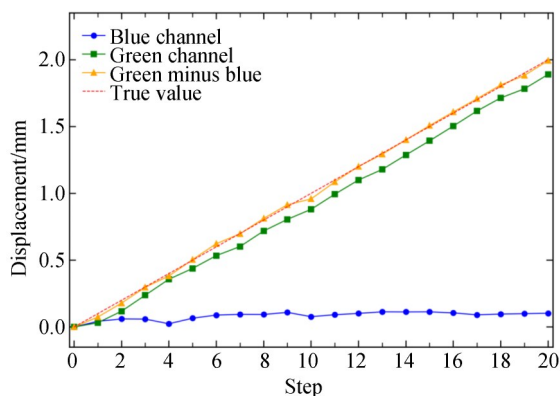


图7 热扰动下y方向位移均值随加载步的变化

Fig. 7 Variation of mean y-direction displacement with loading step under thermal disturbance

从折线图变化趋势来看,补偿后的黄色曲线与红色真值曲线基本重合,说明热扰动差分补偿模型具有较好的补偿效果。以第14个加载步为例,当参考组,即真值的位移矢量均值为1.400 0 mm时,补偿前的位移矢量,即绿色通道位移均值为1.287 2 mm,而补偿后的位移矢量均值,即绿色通道位移均值减蓝色通道位移均值为1.400 1 mm。由计算可知,补偿前的相对误差为8.06%,补偿后的相对误差降低至0.01%。结果表明,热扰动差分补偿模型能够有效剔除热扰动干扰,使补偿后的位移测量结果基本接近参考真值,显著提升了位移测量精度。

为进一步验证所提出热扰动补偿方法在不同位移方向下的适用性,在完成y方向位移测量实验的基础上,进一步开展了x方向负向位移扩展实验,结果如图8所示。

从图8可以看出,随着加载步数的增加,绿色通道位移均值整体呈负向递增趋势,说明绿色通道能够反映试件位移变化的基本规律。但与真值相比,绿色通道原始位移结果存在一定偏差,表明其仍受到热扰动因素的影响。蓝色通道位移均值整体数值较小,且主要表现为正向波动。

对绿色通道和蓝色通道位移结果进行差分

处理后,补偿后的黄色曲线与红色真值曲线更加接近,二者在多数加载步节点处基本重合。以第20个加载步节点为例,参考真值为-2.000 0 mm,补偿前绿色通道位移均值为-1.968 4 mm,相对误差为1.58%;补偿后,补偿后位移均值为-1.994 1 mm,相对误差降低至0.30%。这说明该方法能够在x方向负向位移条件下有效削弱热扰动误差,使测量结果更准确。

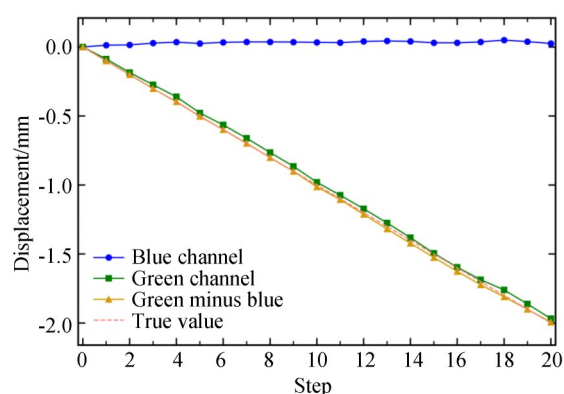


图8 热扰动下x方向负向位移均值随加载步的变化

Fig. 8 Variation of mean negative x-direction displacement with loading step under thermal disturbance

为进一步从三维位移输出层面评价所提热扰动补偿方法的有效性,本文还计算了不同加载步下三维变形矢量模的均值。对于第 k 个加载步下第 i 个有效测点,绿色通道重建得到的复合三维位移矢量记为 $U_{G,i}^k = (u_{G,i}^k, v_{G,i}^k, w_{G,i}^k)$,蓝色通道重建得到的热扰动三维位移矢量记为 $U_{B,i}^k = (u_{B,i}^k, v_{B,i}^k, w_{B,i}^k)$ 。根据三维位移场差分补偿模型,补偿后的三维位移矢量可表示为:

$$U_{C,i}^k = U_{G,i}^k - U_{B,i}^k, \quad (5)$$

其三维变形矢量模为:

$$\|U_{C,i}^k\| = \sqrt{(u_{G,i}^k - u_{B,i}^k)^2 + (v_{G,i}^k - v_{B,i}^k)^2 + (w_{G,i}^k - w_{B,i}^k)^2}. \quad (6)$$

进一步对ROI内所有有效测点求平均,得到各加载步下的三维变形矢量模均值,结果如图9所示。从图中可以看出,绿色通道原始三维变形矢量模随加载步增加呈近似线性增长趋势,但其结果与参考真值之间存在一定偏差,说明复合位

移场中仍叠加了热扰动引起的附加位移分量。蓝色通道三维变形矢量模整体处于较低水平,并在部分加载步出现波动,反映了热扰动位移分量随时间的变化特征。经三维位移矢量逐点差分后,补偿结果与参考真值曲线更加接近,且随加载步保持良好的线性变化关系,表明所提方法不仅能够对单一方向位移分量上削弱热扰动误差,也能够对三维变形矢量模层面提高测量结果与真实加载量的一致性。

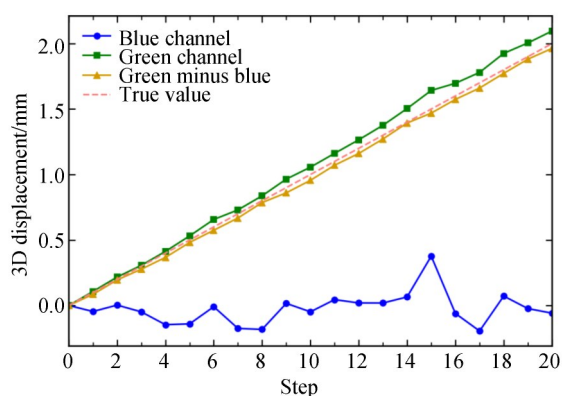


图 9 热扰动下三维变形矢量模均值随加载步的变化

Fig. 9 Variation of the mean 3D deformation vector magnitude with loading step under thermal disturbance

以第 14 个加载步为例,参考真值为 1.400 0 mm,绿色通道原始三维矢量模均值为 1.503 7 mm,相对误差为 7.40%;补偿后三维矢量模均值为 1.393 3 mm,相对误差降低至 0.48%。这进一步说明三维位移场差分补偿能够有效削弱热扰动对三维测量结果的影响,使补偿后的三维变形矢量模结果更加接近参考真值。

结合前述实验结果可知,所提出的基于图像通道差分的热扰动补偿方法在不同位移方向和不同位移符号条件下均具有较好的补偿效果,能够有效提高高温环境下 DIC 位移测量结果的稳定性与可靠性,表明该方法具有较好的适用性和工程应用潜力。

3.4 高温炉实验验证

基于上述验证实验,本文最终将试件移至高温炉中进行高温炉加载实验,验证所提的单相机双通道三维 DIC 方法在真实高温热扰动环境下位移测量的正确性。

实验系统如图 10 所示。首先,将试件固定于

拉伸试验机夹具中,并启动高温炉加热系统,使炉内温度升至目标温度 600 °C,保持恒温 10 min,以使试件周围热流场及加载系统的热状态趋于稳定。高温炉附近用于位移传递和定位的关键构件采用低热膨胀殷钢制造,以减小温度变化引起的尺寸漂移。达到热稳态后,将拉伸试验机位移读数重新归零,并采集加载前的双通道图像作为第 0 加载步参考图像。随后控制拉伸试验机以 0.1 mm/step 的位移增量带动试件沿 x 方向逐步移动,并在每个加载步同步采集一帧双通道图像。

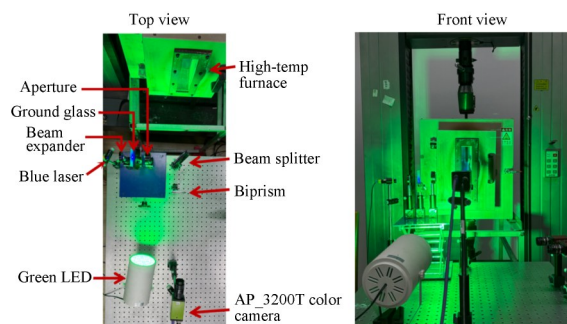


图 10 高温炉实验系统

Fig. 10 Experimental setup of high-temperature furnace system

对获取的彩色图像序列进行裁剪及通道分离处理,分别提取图像左右区域的蓝色通道与绿色通道图像,并通过三维 DIC 方法分别计算两通道图像对应的试件位移场。最后,根据所提出的热扰动补偿模型,对两通道获得的位移场进行差分处理,以补偿热扰动对测量结果的影响。

从 x 方向位移随加载步变化折线图的整体趋势来看,绿色通道位移均值随加载步增大呈近似线性上升趋势,其变化规律与参考真值基本一致,但整体略高于真值曲线,说明绿色通道原始位移结果中受到热扰动影响,存在一定正向测量偏差。蓝色通道位移均值整体数值较小,但同样随加载步增大呈缓慢上升趋势,表明蓝色通道主要反映了高温环境下热扰动引起的附加位移误差,如图 11 所示。

对绿色通道和蓝色通道位移结果进行差分补偿,补偿前后的结果如图中黄色折线所示。与原始绿色通道位移结果相比,补偿后的位移均值曲线与真值曲线更加接近,二者在多数加载步节

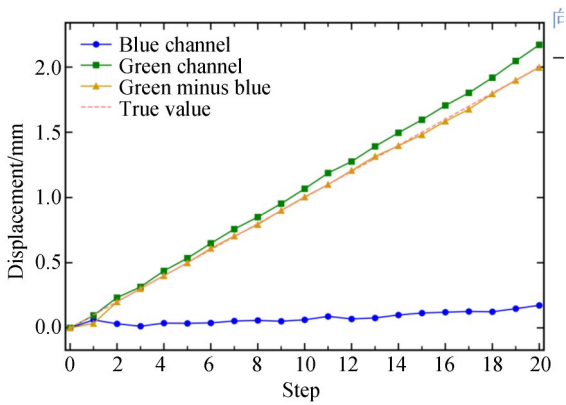


图 11 高温炉实验中 x 方向位移均值随加载步的变化
Fig. 11 Variation of mean x -direction displacement with loading step in high-temperature furnace experiment

点处基本重合,说明差分处理能够有效削弱热扰动造成的测量偏差,使位移变化趋势更加连续、稳定。

以加载步数为 20 时的测量结果为例,当参考真值为 2.000 0 mm 时,补偿前绿色通道位移均值为 2.170 4 mm,相对误差为 8.52%;经热扰动

补偿后,绿色通道位移均值减蓝色通道位移均值为 1.997 1 mm,相对误差降低至 0.15%。这表明所提出的热扰动补偿方法能够有效削弱高温环境下气体折射率波动对图像测量结果的影响,提高 DIC 方法在高温条件下的位移测量稳定性与可靠性。该方法无需额外独立热扰动参考传感器,主要通过同步采集的图像通道信息实现热扰动补偿,具有良好的工程应用潜力。

3.5 全加载过程整体误差评价

前述实验主要结合位移变化曲线及若干典型加载步,对热扰动补偿效果进行了分析。为进一步评价所提方法在连续加载过程中的整体性能,对含热扰动刚体 y 方向位移、刚体 x 方向负向位移、三维变形矢量模均值以及高温炉 x 方向位移实验第 1~20 加载步的误差进行统计,第 0 步参考状态不纳入计算。分别采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、最大绝对误差和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 评价补偿前后测量结果与参考真值之间的偏差,结果如表 1 所示。

表 1 各加载实验全加载过程误差统计结果

Tab. 1 Overall error statistics over the entire loading process for different experiments

实验工况	平均绝对误差/mm		最大绝对误差/mm		均方根误差/mm	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
含热扰动刚体 y 方向位移	0.090 841	0.012 593	0.121 285	0.041 865	0.093 396	0.015 995
含热扰动刚体 x 负方向位移	0.025 637	0.009 011	0.039 700	0.026 400	0.027 894	0.012 748
三维变形矢量模均值	0.063 509	0.026 693	0.141 966	0.044 368	0.074 356	0.028 773
高温炉 x 方向位移	0.074 404	0.009 440	0.170 400	0.065 460	0.085 303	0.017 240

注:统计范围为第 1~20 加载步,第 0 步参考状态不纳入整体误差统计。

由表 1 可知,4 种实验工况下补偿后的 MAE、最大绝对误差和 RMSE 均低于补偿前。其中,MAE 降低 57.97%~87.31%,最大绝对误差降低 33.50%~68.75%,RMSE 降低 54.30%~82.87%。这表明所提方法在整个加载过程中均能有效削弱热扰动引起的测量偏差,其补偿效果并非仅体现在所选取的典型加载步,同时验证了该方法在不同位移方向、不同位移表征形式及真实高温环境下的稳定性和适用性。

4 结 论

本文针对高温环境下 DIC 测量中热扰动伪位移与结构真实位移难以分离的问题,提出了基于单相机双棱镜伪立体 DIC 的双通道共轴投影散斑热扰动补偿方法。该方法将单相机伪立体三维重建与双通道共轴热扰动补偿相结合,在单台彩色相机条件下实现了三维位移测量与热扰动误差补偿的统一。研究结果表明,基于双棱镜构建的左右虚拟视角能够实现单相机条件下的

三维 DIC 测量,为受限观测窗口和高温测试环境中的三维位移重建提供了一种结构紧凑的实现方案。同时,蓝色投影散斑通道与绿色喷涂散斑通道对同一热流场引起的扰动具有较好的一致性。纯扰动实验中,两通道热扰动位移场的 Pearson 相关系数达到 0.989 870,平均绝对误差和均方根误差分别为 0.004 756 mm 和 0.005 802 mm,说明利用蓝色投影散斑通道表征热扰动分量具有较好的可行性,为后续差分补偿提供了实验依据。进一步的实验验证表明,基于双通道位移场差分的补偿方法能够有效削弱热扰动对位移测量结果的影响。在含热扰动刚体位移实验中, y 方向位移在第 14 个加载步处的相对误差由补偿前的 8.06% 降低至 0.01%, x 方向负向位移在第 20 个加载步处的相对误差由 1.58% 降低至 0.30%;在高温炉加载实验中, x 方向位移在第 20 个加载步处的相对误差由 8.52% 降低至 0.15%。三维变形矢量模对比结果表明,补偿后三维矢量模均值与参考真值具有较好一致性,说明该方法的补偿效果不仅体现在 x, y 单方向位移分量上,也能够三维位移矢量输出层面得到验证,从而进一步支撑了单相机双棱镜系统用于三维变形测量的可行性。所提方法能够在真实高温扰动环境下有效补偿由空气折射率波动引起的测量偏差,提高三维位移测量结果的准确性和稳定性,为受限高温环境中的非接触全场三维变形测量提供了一种可行技术路径。

需要指出的是,该方法的补偿效果依赖于双通道热扰动分量具有较好的一致性,其工程应用需保证蓝色投影散斑与绿色表面散斑沿共轴或

高度一致的光路传播,并由同一相机同步采集;同时,蓝绿通道应具有良好的光谱分离效果,投影散斑和表面散斑应具备足够的灰度对比度、随机性和成像清晰度。当双通道光路存在明显偏差、通道串扰或背景热辐射较强,或者热扰动过强、变化过快而导致散斑图像严重畸变及相关匹配失效时,两通道热扰动分量的一致性和位移场提取精度均可能下降,从而产生补偿残差。此外,本文高温炉实验采用热稳态归零后拉伸试验机的相对位移增量作为参考位移,高温炉附近用于位移传递和定位的关键构件采用低热膨胀殷钢,并通过恒温稳定及加载前重新归零减小系统热漂移。然而,该参考位移仍可能受到试验机示值误差、局部温度梯度及残余热膨胀的影响,尚不能等同于由独立高精度测量装置获得的绝对真值。后续将采用高温引伸计或独立位移传感器进行交叉验证,并进一步定量研究光轴偏差、通道串扰、热扰动强度和散斑质量对补偿精度及适用边界的影响。

作者贡献说明:

宋浩林:实验实施,数据整理、管理与分析,论文初稿撰写;

陈萌萌:实验实施,数据整理,论文审核与编辑写作;

杨乐义:实验数据分析;

王永红:研究执行过程中的项目管理、组织协调与指导;

李骏睿:方法提出,论文构思,实验设计与研究指导。

参考文献:

- [1] PAN B, QIAN K M, XIE H M, *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20 (6): 062001.
- [2] SCHREIER H, ORTEU J J, SUTTON M A. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications* [M]. Boston, MA: Springer US, 2009.
- [3] PAN B, YU L P, ZHANG Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement [J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(1): 2-20.
- [4] JONES E M C, REU P L. Distortion of digital image correlation (DIC) displacements and strains from heat waves [J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(7): 1133-1156.
- [5] BERNY M, ARCHER T, MAVEL A, *et al.* On the analysis of heat haze effects with spacetime DIC [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111:

- 135-153.
- [6] PAN B, WU D F, WANG Z Y, *et al.* High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 °C[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22 (1) : 015701.
- [7] GRANT B B, STONE H J, WITHERS P J, *et al.* High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, 44 (4) : 263-271.
- [8] HAN S M, GOO N S. High-temperature DIC deformation measurement under high-intensity black-body radiation[J]. *Aerospace*, 2024, 11(6): 479.
- [9] MA C, ZENG Z M, ZHANG H, *et al.* A correction method for heat wave distortion in digital image correlation measurements based on background-oriented schlieren [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9 (18): 3851.
- [10] ZHANG X Y, LI C Z, YU L P, *et al.* Heatwave distortion correction using an improved reference sample compensation method and multispectral digital image correlation [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3716.
- [11] SONG J L, YANG J H, LIU F J, *et al.* High temperature strain measurement method by combining digital image correlation of laser speckle and improved RANSAC smoothing algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 8-18.
- [12] LI J R, ZHOU L, YANG L Y, *et al.* Frequency enhanced multi-scale fusion network for high temperature speckle image restoration [J]. *Measurement Science and Technology*, 2026, 37 (7) : 075005.
- [13] YU L P, LUBINEAU G. Modeling of systematic errors in stereo-digital image correlation due to camera self-heating [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6567.
- [14] WANG H Q, WANG Y H, ZHU Y L, *et al.* Method to eliminate thermal disturbance errors in digital image correlation measurement based on projection speckle [J]. *Applied Optics*, 2020, 59 (33): 10474.
- [15] PAN W L, LIU Q S, LI J R, *et al.* High-temperature thermal disturbance elimination method based on multi-channel extraction and correction[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(2): 367.
- [16] 李骏睿, 曾湘文, 周露, 等. 多通道数字图像相关的柔性屏多层应变同步测量[J]. 光学 精密工程, 2025, 33(15): 2354-2364.
- LI J R, ZENG X W, ZHOU L, *et al.* Synchronous multilayer strain measurement of flexible displays based on multi-channel digital image correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(15): 2354-2364. (in Chinese)
- [17] LI J R, SONG H L, CHEN M M, *et al.* A method of thermal disturbance elimination for high-temperature DIC measurement using dual-channel coaxial projected speckles [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2026, 203: 109842.
- [18] WU L F, ZHU J G, XIE H M. A modified virtual point model of the 3D DIC technique using a single camera and a bi-prism [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(11): 115008.
- [19] LI J R, DAN X Z, XU W, *et al.* 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 95: 1-7.
- [20] PAN B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001.
- [21] 马衍成, 温清风, 隋顺顺, 等. 基于曲面反射的单相机全景三维数字图像相关法[J]. 光学 精密工程, 2025, 33(15): 2478-2490.
- MA Y CH, WEN Q F, SUI SH SH, *et al.* Single-camera panoramic 3D digital image correlation method based on curved surface reflection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33 (15) : 2478-2490. (in Chinese)
- [22] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [23] 郭建英, 梁晋, 叶美图, 等. 反射镜面辅助的航空机匣三维变形多视角测量[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(24): 3105-3115.
- GUO J Y, LIANG J, YE M T, *et al.* Mirror-assisted multi-view measurement of 3D deformation for aero-engine casing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(24): 3105-3115. (in Chinese)

- [24] 何新党,周润,王龙龙,等. 超高温环境下基于数字图像的测量技术研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(3): 473-483.
HE X D, ZHOU R, WANG L L, *et al.* Research

on measurement technology based on digital image correlation in ultra-high temperature environment [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(3): 473-483. (in Chinese)

作者简介:



宋浩林(2002—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事机器视觉与光电检测等方面的研究。E-mail: 2024170008@mail.hfut.edu.cn

通讯作者:



李骏睿(1990—),男,博士,副研究员,2019年于美国奥克兰大学获得博士学位,2019年至2021年在美国密西西比大学国家物理声学中心担任博士后研究员,主要研究领域为全场光学精密测量技术,包括数字图像相关、激光散斑干涉、激光多普勒技术等。E-mail: lijunrui@hfut.edu.cn