

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.03

基于退化函数自适应优化与灰度平均的高温DIC测量方法

毛承浣¹, 高山^{1,2*}, 刘海龙¹, 王梓旭¹

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江省先进智能感知技术协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对高温环境下热气流扰动导致的散斑图像模糊及噪声耦合难题, 提出融合图像退化理论与多帧信号处理的协同复原方法。首先, 通过构建基于结构相似性指数 (Structural Similarity Index, SSIM) 的自适应损失函数优化模型, 自适应估计退化参数, 突破传统固定退化模型与实际热扰动失配的局限性; 然后, 结合维纳滤波与灰度平均技术, 实现去模糊与降噪的联合优化, 解决噪声抑制与细节保留难以兼顾的技术问题。600 °C 高温实验平台验证结果表明: 利用传统灰度平均法处理得到的图像位移测量均方根误差为 0.006 4 mm; 利用基于退化函数自适应优化与灰度平均的高温数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 测量方法处理得到的图像位移测量均方根误差为 0.004 7 mm, 图像质量显著提升, 满足亚像素级精度要求。该方法无需使用复杂硬件, 且无需预知热流场参数, 显著提升了高温 DIC 测量的鲁棒性, 为极端工况下的材料变形分析提供了低成本、高精度的解决方案, 具有重要工程应用价值。

关键词: 热扰动; 退化函数优化; 灰度平均; 数字图像相关; 测量方法

中图分类号: TP391; TB9; O522

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 04-0048-09

High-temperature DIC measurement method based on adaptive optimization of degradation function and grayscale average

MAO Chengshuang¹, GAO Shan^{1,2*}, LIU Hailong¹, WANG Zixu¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Heilongjiang Province Advanced Intelligent Perception Technology Collaborative Innovation Center, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the challenges of speckle image blurring and noise coupling caused by thermal airflow disturbances in high-temperature environments, a collaborative restoration method that integrates image degradation theory and multi-frame signal processing is proposed. Firstly, by constructing an adaptive loss function optimization model based on the Structural Similarity Index (SSIM), the degradation parameters are adaptively estimated, breaking through the limitations of the mismatch between the traditional fixed degradation model and the actual thermal disturbances. Then, by combining Wiener filtering and grayscale averaging techniques, the joint optimization of deblurring and denoising is achieved,

收稿日期: 2025-04-07; **修回日期:** 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62275059); 黑龙江省自然基金项目 (YQ2023F014); 中央高校基本科研业务项目 (3072024XX0807); 精密测试技术及仪器全国重点实验室开放课题项目 (2024PMTI03)

引用格式: 毛承浣, 高山, 刘海龙, 等. 基于退化函数自适应优化与灰度平均的高温 DIC 测量方法 [J]. 计测技术, 2025, 45(4): 48-56.

Citation: MAO C S, GAO S, LIU H L, et al. High-temperature DIC measurement method based on adaptive optimization of degradation function and grayscale average [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 48-56.



solving the technical problem of balancing noise suppression and detail preservation. The verification results on a 600 °C high-temperature experimental platform show that the root mean square error of image displacement measurement processed by the traditional grayscale averaging method is 0.006 4 mm; the root mean square error of image displacement measurement processed by the high-temperature Digital Image Correlation (DIC) measurement method based on adaptive optimization of the degradation function and grayscale averaging is 0.004 7 mm, and the image quality is significantly improved, meeting the sub-pixel accuracy requirements. This method does not require the use of complex hardware and does not need to know the parameters of the heat flow field in advance, significantly improving the robustness of high-temperature DIC measurement. It provides a low-cost and high-precision solution for material deformation analysis under extreme working conditions and has important engineering application value.

Key words: thermal disturbance; degradation function optimization; grayscale averaging; DIC; measurement method

0 引言

DIC 技术^[1]是一种非接触式的现代光学测量技术, 其具有光路简单、环境适应性好、测量范围广等优点, 已广泛应用于工程领域。DIC 的测量结果与图像质量密切相关, 然而在高温环境下, 传统的 DIC 测量方法面临巨大的挑战: 高温下的热气流容易使采集的图像出现模糊、失真以及噪声较大等问题, 严重影响测量的准确性^[2]。因此, 高温下的图像复原问题是研究重点, 近年来, 国内外众多科研团队不断探索新的图像处理算法、抗热干扰的方法等, 以提高高温 DIC 测量的精度和可靠性。

2011 年, PAN B 等人^[3]使用蓝色发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 和带通滤光片来减少背景光的影响, 提高采集图像质量。2015 年, SU Y Q 等人^[4]通过对 DIC 采集的多幅图像求灰度平均的方法, 来抵抗热气流折射效应的影响。2017 年, ZHANG M 等人^[5]使用光线追踪原理校正高温变形测量中由热气流引起的畸变, 但其分析依赖已知的热流场参数。2018 年, HU Y 等人^[6]运用逆滤波的图像修复方法, 提升了图像的质量。2020 年, PAN Z 等人^[7]在真空室中进行了高温 DIC 实验, 从根本上消除了热气流。虽然此研究取得了令人满意的结果, 但由于成本和环境限制, 该方法很难应用于实际工程中。2022 年, WANG H 等人^[8]提出了一种基于图像处理的方法, 通过图像去雾增强处理和逆滤波恢复来降低热辐射和热扰动的影响, 并在 1 200 °C 条件下进行了一系列实验, 验证了该方法的

可行性和有效性。2023 年, LU N 等人^[9]提出了一种基于深度学习的方法, 以降低热雾对高温 DIC 测量结果的影响。热雾图像通过改进的生成对抗网络 (Wasserstein Generative Adversarial Network, WGAN) 进行校正, 该研究团队在室温和高温环境下证明了该方法的有效性和鲁棒性。2024 年, CUI Y 等人^[10]提出了一种提高高温 DIC 测量精度的图像预处理方法, 并进行了一系列高温实验以证明其有效性。同年, PAN W L 等人^[11]提出了一种多通道分离技术, 该技术结合低成本激光散斑装置能够降低高温 DIC 测量中的热扰动误差。

尽管上述方法在一定程度上提升了高温 DIC 的测量精度, 但仍存在共性局限: 依赖高斯模糊、光线追踪等固定模型或仅进行灰度平均处理噪声, 并未解决单幅图像的模糊问题, 普适性受限。针对上述问题, 本文提出一种基于退化函数自适应优化的图像复原方法, 构建广义高斯退化函数 (自适应优化大气湍流退化参数), 通过 SSIM 损失函数实现退化模型与热扰动特性的动态匹配; 在去模糊的基础上, 通过灰度平均进一步降噪, 解决模糊-噪声耦合问题, 为非真空高温环境下的散斑图像复原提供一种低成本、高鲁棒性的解决方案。

1 热扰动和图像复原

热扰动是指高温环境下气体受热不均匀, 致使局部密度随温度变化产生差异的现象。在空气成分相对稳定的情况下, 空气的折射率主要取决于密度分布。在高温环境下, 气体密度的不断变化会使光在传播过程中不断发生折射, 相机采集

图像时会出现抖动、偏移甚至错位,影响测量精度。

气体密度和折射率之间的关系由 Gladstone-Dale^[12]公式表示,即

$$n - 1 = K\rho \quad (1)$$

式中: K 为代表气体特性的 Gladstone-Dale 常数,对于可见光波长, $K \approx 2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{g}$; ρ 为气体密度; n 为气体的折射率。

由式(1)可知,在高温下产生的热扰动是不规则的,因为 ρ 和 n 是随机变化的。可以认为:热扰动对图像的退化影响与大气湍流引起的图像退化类似^[8],退化函数 $H(u, v)$ 表示为

$$H(u, v) = \exp[-\alpha(u^2 + v^2)^\beta] \quad (2)$$

式中: u 和 v 为频域中 2 个二维离散变量,分别对应时域图像的 x 和 y ; α 和 β 为表征热扰动强度的参数, α 越大,退化函数在频域的衰减越快,对应更严重的低通滤波效应(图像更模糊), β 则控制退化函数的形状。在本文的初始参数估计中, α 取 $0.000\,025$ ^[8]; β 取定值 $5/6$,对应大气湍流的典型频谱特性,适用于热扰动引起的长曝光模糊。

SSIM 能够衡量 2 幅图像亮度、对比度、结构 3 方面的相似性。DIC 技术依赖散斑图像的局部结构特征进行位移匹配, SSIM 通过结构相似性评估直接反映图像细节的保留程度,与 DIC 的测量需求高度契合。在图像复原的过程中,构建基于 SSIM 的损失函数。通过最大化复原图像与清晰参考图像之间的 SSIM 值,驱动 α 、 β 的优化过程,实现退化模型与实际热扰动特性的动态匹配。损失函数值取最小时, SSIM 的值最大(因损失函数值取值为负)。

在图像复原过程中,参数优化具有非光滑、非线性且多变量的特性,因此选用 `fminsearch` 函数进行优化,通过不断调整 α 和 β 的值,实现图像复原。绘制迭代收敛曲线,对迭代次数进行系统分析,结果图 1 所示,经过大约 10 次迭代后,损失函数值趋于稳定。对迭代次数 50 ~ 150 的数据重新进行了局部绘图,结果如图 2 所示,可以看出曲线的变化幅度并不明显。计算 600 °C 条件下,迭代 100 次相对迭代 50 次的损失函数提高率、迭代 150 次相对迭代 100 次的损失函数提高率、迭代 200 次

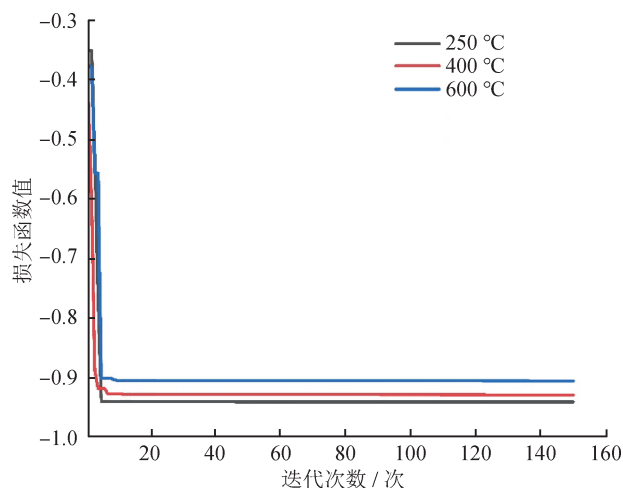


图1 迭代曲线

Fig.1 Iteration curve

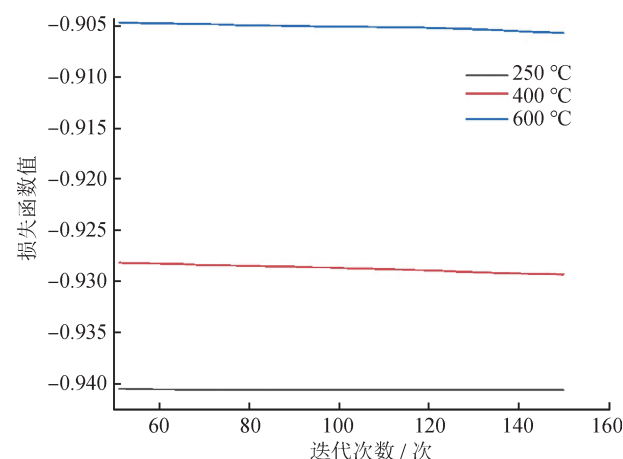


图2 局部迭代曲线

Fig.2 Local iteration curve

相对迭代 150 次的损失函数提高率分别为 0.051%、0.064%、0.038%。为兼顾优化效率与复原效果,选择最大迭代次数为 150 次。

对单幅图像复原时,初始化参数后,根据式(2)在频域生成二维退化函数 $H(u, v)$,通过最大化复原图像与参考图像的 SSIM 值,不断优化 α 和 β ,并使用新的退化函数优化图像,重新计算 SSIM,多次循环直到满足条件。得到优化后的退化函数 $H(u, v)$ 后,将其从频域转换到空域,作为点扩散函数,进行维纳滤波去模糊,然后通过直方图匹配进一步增强图像细节。单幅图像复原流程图如图 3 所示。

在图像去模糊的过程中会引入噪声误差,采用灰度平均方法降低误差。对于含有热扰动误差

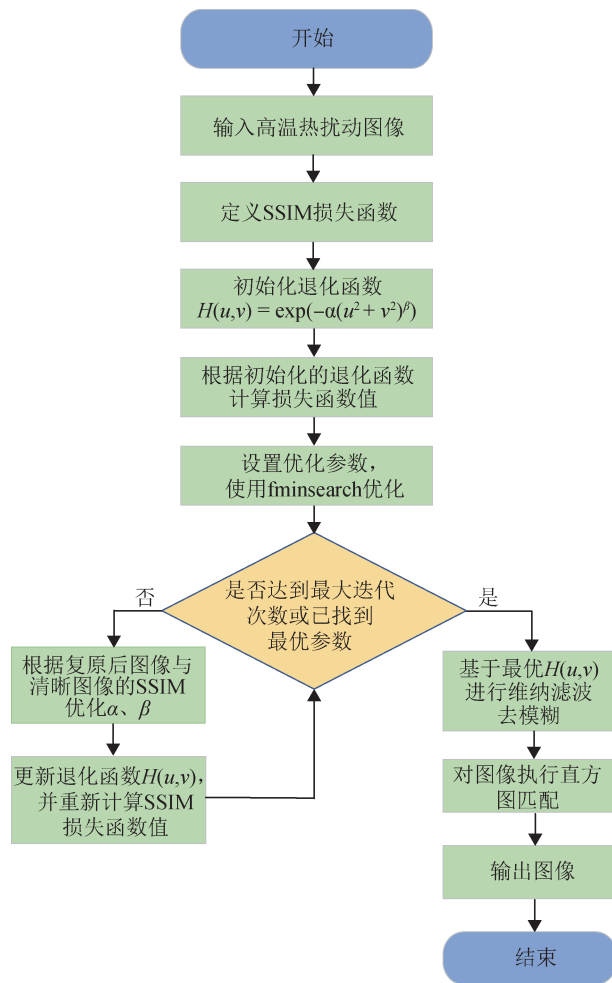


图3 单幅图像复原流程图

Fig.3 Flow chart of single image restoration

的原始图像,有以下数学关系

$$g_i(x, y) = g_0(x, y) + r_i(x, y), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: $g_i(x, y)$ 为相机采集得到的图像灰度值, $g_0(x, y)$ 为无热扰动误差干扰的理想灰度值, $r_i(x, y)$ 为热扰动误差引起的灰度值, i 为图像数量。

利用灰度平均技术求解图像平均灰度 $\bar{g}(x, y)$, 计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{g}(x, y) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_0(x, y) + r_i(x, y)) = \\ &= g_0(x, y) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: N 为输入图像的总数。

信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 是衡量信号与噪声强度比值的指标。灰度平均后图像的信噪比 $\bar{S}_{\text{SNR}}$ 可表示为

$$\bar{S}_{\text{SNR}} = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m g_0^2(x, y)}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(x, y) \right)^2 \right]} \quad (5)$$

热扰动误差 $r(x, y)$ 可以表示为^[13]

$$r(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)^{\frac{5}{6}}}{2(\sigma/\pi)^2} \right] \quad (6)$$

式中: σ 为热扰动标准差, 值越大, 热扰动误差越大。 $r(x, y)$ 的分布形式与高斯噪声近似, 服从正态分布。因此, 随着图像数量 N 增加, $r(x, y)$ 的均值趋近于零, 灰度平均后图像的信噪比显著提升, 能够有效改善图像质量。

灰度平均法使用需要多帧图像, 且热气流扰动对图像的影响是动态变化的。因此, 在不同温度下均采用图像序列的采集方法, 即每个温度下采集 15 帧图像, 对复原后的 15 幅图像进行灰度平均, 以降低噪声误差, 提高信噪比。

2 散斑模拟实验

散斑模拟实验目的为: 在进行真实实验前, 利用计算机进行热扰动高温散斑仿真实验, 验证算法的可行性。用文献[4]中描述的高温扰动模拟散斑图原理来定量分析不同热扰动强度下的变形 $I_R(x, y)$, 公式为

$$I_R(x, y) = I(x, y) + d \cdot T(x, y) + N(x, y) \quad (7)$$

式中: $I(x, y)$ 为计算机生成的初始散斑图像; $T(x, y)$ 为热扰动误差函数; d 为扰动系数, 用于模拟不同温度下的热扰动强度; $N(x, y)$ 为噪声密度为 0.02 的椒盐噪声, 用于模拟实际相机采集的图像在采集和传输过程中可能出现的损耗^[14]。

热扰动的核心影响是由于气体密度变化导致的光学退化, 而大气湍流退化函数已通过参数 α 、 β 概括了所有与扰动强度相关的因素 (包括温度、气流速度等)。直接引入温度变量会增加模型复杂度, 因此通过调整 d 的取值, 放大或缩小热扰动误差的幅度, 模拟不同温度下的扰动强度。像素与毫米的转换关系为: 1 pixel = 0.020 831 mm。模拟实验中, 散斑图尺寸设置为 512 pixels $\times$ 512 pixels; 散斑的峰值强度和大小分别为 1、1.5 pixels; 散斑

总数为3 000个。需要对生成的模拟图像加载位移,基于DIC的分析结果得到热扰动的影响及算法处理后的结果。变形前散斑粒子 k 的中心位置为 (x_k, y_k) ,变形后散斑粒子 k 的中心位置为 (x'_k, y'_k) ,则模拟散斑图像像素点的位移加载公式为

$$\begin{cases} x'_k = x_k + u_0 + u_x x_k + u_y y_k \\ y'_k = y_k + v_0 + v_x x_k + v_y y_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_0 和 v_0 为预设位移分量, u_x 、 u_y 、 v_x 和 v_y 为预设位移梯度分量。本实验中生成的原始散斑图和模拟高温散斑图像如图4所示。

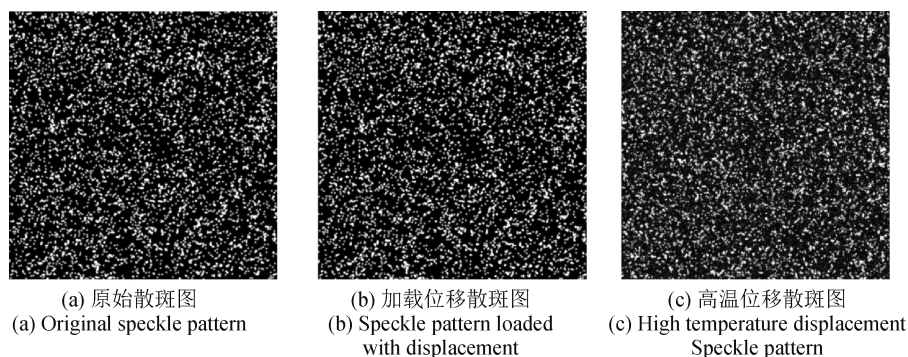


图4 散斑图

Fig.4 Speckle pattern

设置 $d = 7$ 、10、12(分别对应温度600、700、800 °C)^[4],生成不同温度下的高温散斑图像。使用本文所提出的方法对生成的图像进行处理,之后进行图像质量评估,结果如图5所示,可以看出:

不同扰动系数下,利用本文所提出的方法进行处理后,图像的SSIM和峰值信噪比(Peak Signal-to-noise Ratio, PSNR)均有所提升,证明了该方法的有效性。

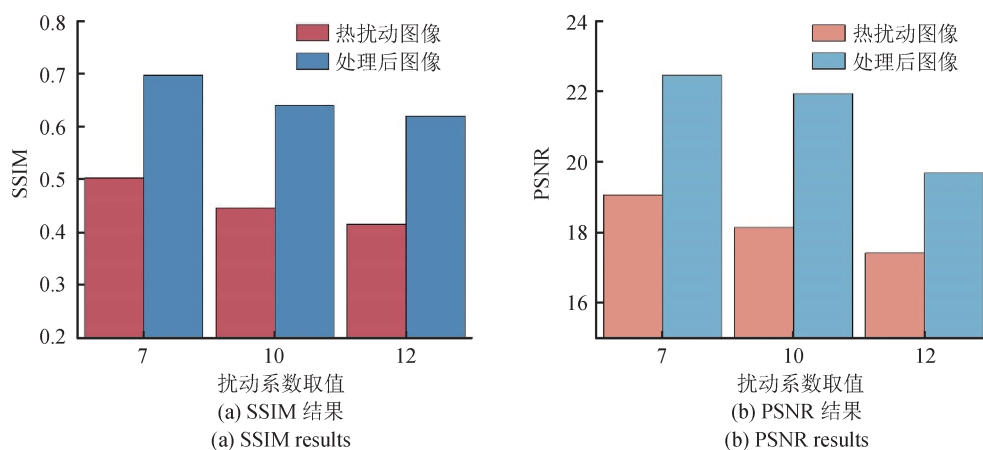


图5 实验结果对比

Fig.5 Comparison of image quality assessment results

DIC分析的子区半径大小为15 pixels,步长为5 pixels,感兴趣区域(Region of Interest, ROI)为矩形。根据模拟设置进行应变计算,结果如表1所示,其中, ε_{xx} 、 ε_{yy} 分别为水平方向和垂直方向上的应变。由表1可知: $d = 0$ 时(原始位移图像)的应变误差最小,但仍与理论值存在差异,这是DIC算法造成的系统误差导致的; x 方向的误差明显小于

y 方向的误差,这是因为设置的应变较大,热扰动造成的影响相对不明显;经过处理后,2个方向上的应变误差均有所降低。

3 热扰动实验

热扰动实验旨在验证基于退化函数自适应优化与灰度平均的高温DIC测量方法降低热扰动误

表1 应变计算结果及误差
Tab.1 Strain calculation results and errors

图像	$\varepsilon_{xx}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{yy}/\mu\varepsilon$	ε_{xx} 误差 / %	ε_{yy} 误差 / %
$d = 0$ 时	1 997.875	1 006.527	0.106 3	0.652 7
$d = 7$ 时	1 976.295	928.748	1.185	7.125 2
$d = 7$ 时处理后	1 996.07	960.536	0.196 5	3.946 4
$d = 10$ 时	1 944.881	892.668	2.756	10.733 2
$d = 10$ 时处理后	2 015.292	956.967	0.764 6	4.303 3
$d = 12$ 时	2 067.451	971.892	3.373	2.810 8
$d = 12$ 时处理后	2 009.25	985.681	0.462 5	1.431 9

差的效果,实验装置如图6所示,使用的相机型号为 Daheng Image MER-1070-14U3C-L,分辨力为 2 748 pixels $\times$ 3 840 pixels;加热炉采用镍铬电阻丝进行加热,最大额定功率为 2 kW;样件材质为 6061 铝合金,在其表面喷涂黑色耐高温涂料作为随机散斑以进行 DIC 分析。通过具有 2 个凹槽的器件固定样件。

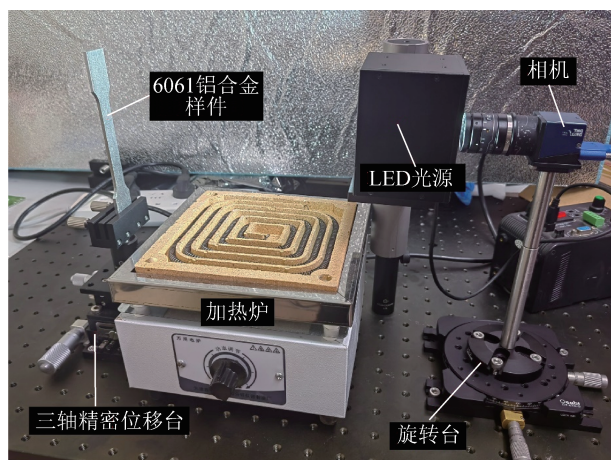


图6 实验装置

Fig.6 Experimental device

组装好装置之后开展热扰动实验,具体操作步骤:

1) 调节相机与样件之间的距离和相机的焦距,直到计算机能显示清晰的样件图像,采集 1 幅图像作为参考图像;

2) 调节三轴位移台的旋钮,使样件垂直向下移动 5 mm,采集 1 幅图像作为初始变形图像;

3) 打开加热炉,将功率调整旋钮调到 1/3 位置,加热 3 min 后,用红外测温枪(型号 UT305A+, 红外测温范围 $-50 \sim 1\,850\,^{\circ}\text{C}$, 误差不超过 $\pm 1.0\,^{\circ}\text{C}$) 测量其中心温度为 $250\,^{\circ}\text{C}$,连续采集 15 帧图像作为第一个热扰动图像序列;

4) 重复步骤 3),在旋钮的 2/3 和全功率位置分别采集热扰动图像序列,记录加热炉中心温度约为 $400\,^{\circ}\text{C}$ 和 $600\,^{\circ}\text{C}$;

5) 关闭加热炉,待温度降低后,清理实验装置;

6) 使用灰度平均算法和本文提出的算法处理图像,将参考图像和变形图像导入 DIC 软件中进行分析。

热扰动实验结果对比如图 7 所示,可以看出:随着温度的提升,图像质量下降;经过复原处理后,图像质量明显提升,且本文提出的方法的图像处理效果比灰度平均法更好。

加载位移过程中,实验样件本身没有受到外力作用从而发生弹性形变,所以本实验中的加载位移可以近似等效为刚体位移^[15]。在理想情况下,实验样件的整场位移值和位移场中值均应为 5 mm。DIC 分析的相关参数设置为:子集半径为 30 pixels,网格步长为 10 pixels,种子点个数为 4,ROI 的大小为 385 pixels $\times$ 984 pixels。纵轴位移场结果如图 8 所示。虽然设置的理论位移为 5 mm,但根据图 8(a)可以看出:实际位移值与理论位移值存在差异,这是 DIC 算法的系统误差导致的。综合分析图 8 可知:热扰动严重影响位移场的分布,

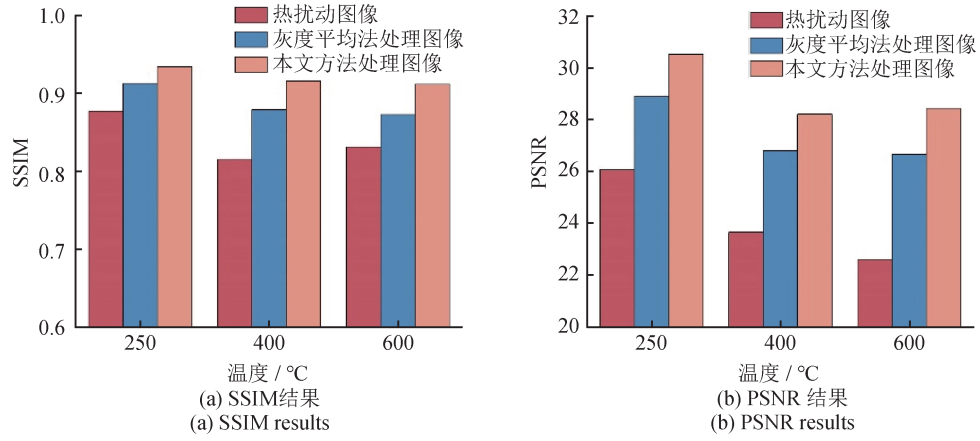


图7 热扰动实验结果对比

Fig.7 Comparison of thermal disturbance experiment results

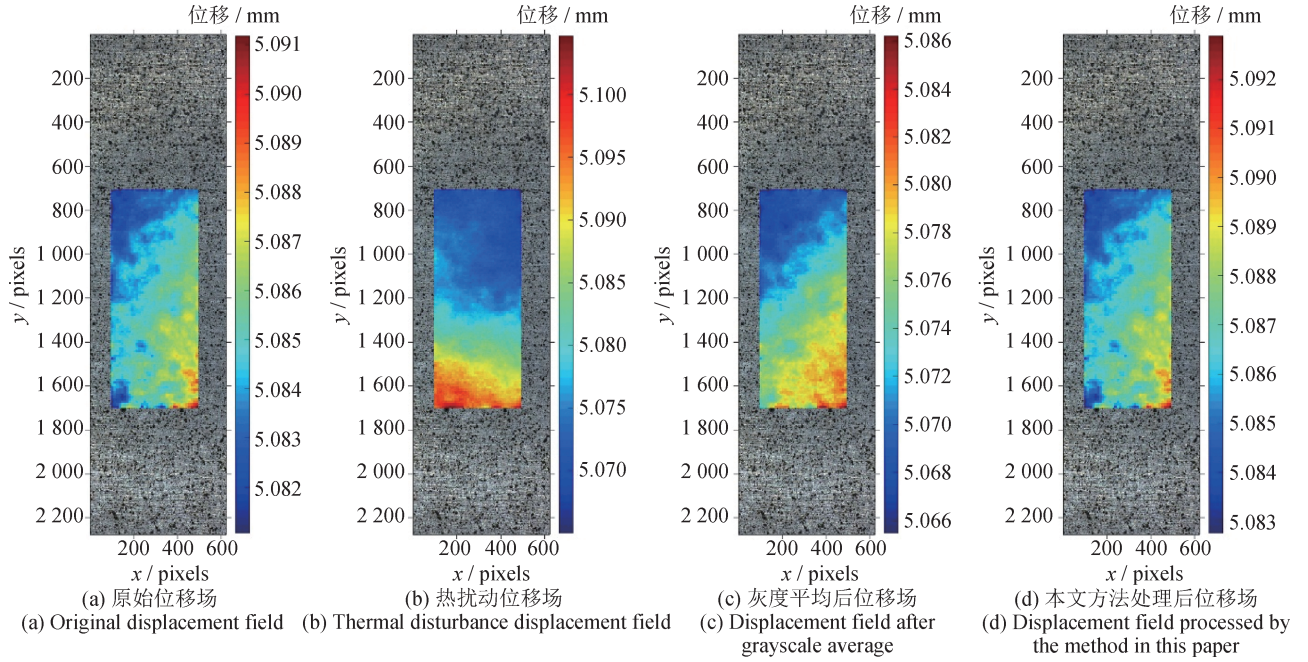


图8 位移场结果

Fig.8 Displacement field results

利用本文提出的方法处理图像后,位移场分布和位移场数值均有所改善,且改善效果相较灰度平均法更好。

对位移场数据进行均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)评估,公式为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (\nu_i - \nu_{\text{true}})^2} \quad (9)$$

式中: R_{RMSE} 为均方根误差; N_0 为测量值的个数,即DIC所得到的位移场数据; ν_i 为测量值; ν_{true} 为真实值,计算过程中选择为原始位移场。 R_{RMSE} 计算结果如表2所示,可以看出:在不同的热扰动情

况下,利用本文方法处理后的图像 R_{RMSE} 最小。计算得到亚像素误差为 0.225 625 pixels,满足亚像素级精度的要求,这表明本文方法有效降低了热扰动的干扰。

应变场根据位移场的数值和梯度变化计算得来,虽然位移场的数值变化不大,但其梯度变化明显不均匀,会导致DIC计算得到的应变场的分布和数值出现明显偏差。应变场结果及消除比如图9所示,可以看出:相较灰度平均方法,本文方法的应变消除比更高,证明本文所提出的方法可以有效降低高温环境对DIC分析产生的干扰。

表 2 R_{RMSE} 计算结果
Tab.2 R_{RMSE} calculation results

单位:mm

图像	R_{RMSE}		
	250 °C条件下	400 °C条件下	600 °C条件下
热扰动图像	0.033 8	0.010 6	0.009 5
灰度平均处理的图像	0.011 2	0.007 9	0.006 4
本文方法处理的图像	0.009 8	0.004 5	0.004 7

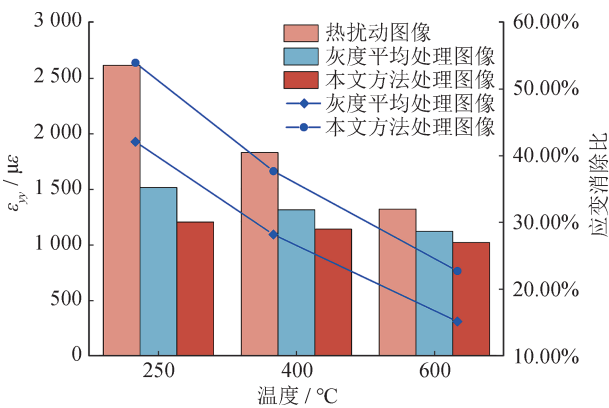


图 9 应变场结果及消除比
Fig.9 Strain field results and elimination ratios

4 结论

针对高温 DIC 测量中的热扰动问题, 提出了基于退化函数自适应优化与灰度平均的高温 DIC 测量方法。通过理论推导和实验验证, 证明了该方法在高温环境下的有效性和鲁棒性。与传统灰度平均法相比, 利用该方法处理后的图像质量提升更明显, 其中 SSIM 最高提升了 0. 039 32, PSNR 最高提升了 1. 769 2, 600 °C 高温下位移场 R_{RMSE} 降至 0. 004 7 mm。本文提出的方法不需要使用复杂的光学测量系统, 装置相对简单, 易于实现, 只需采集图像上传到终端即可, 在 DIC 测量中显示出巨大的应用潜力。

然而, 本方法仍存在一定局限性: 依赖初始图像质量, 当热扰动导致散斑严重模糊或缺失时, 复原算法的精度会显著下降; 基于频域优化的迭代过程(如 50 次迭代)在处理高分辨力图像时耗时较长。为了应对这些挑战, 在未来的研究中将进行改进, 比如结合深度学习建立热扰动图像数据集, 训练端到端的复原模型, 提升对复杂退化的泛化能力; 引入稀疏表示或模型降阶技术, 将迭

代次数减少至 50 次以内, 为 DIC 的应用提供更可靠的支持。

参考文献

[1] HAMMER J T, LIUTKUS T J, SEIDT J D, et al. Using Digital Image Correlation (DIC) in dynamic punch tests [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55 (1): 201–210.

[2] YANG D, ZHANG X M, ZHU J G. Noncontact and full-field measurement of residual and thermal stress in film/substrate structures[J]. Surfaces, 2021, 4(1): 89–96.

[3] PAN B, WU D F, WAN Z Y, et al. High-temperature Digital Image Correlation method for full-field deformation measurement at 1 200 °C[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 22(1): 015701.

[4] SU Y Q, YAO X F, WANG S, et al. Improvement on measurement accuracy of high-temperature DIC by gray-scale-average technique [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 75: 10–16.

[5] ZHANG M, MIAO H, XIONG C, et al. On the correction method for distortion caused by heat flow in high temperature deformation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5): 718–724.

[6] HU Y, BAO S, DAN X, et al. Improvement of high-temperature deformation measurement accuracy based on image restoration method[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(9): 094003.

[7] PAN Z, HUANG S, SU Y, et al. Strain field measurements over 3 000 °C using 3D-Digital Image Correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105942.

[8] WANG H, GE P, WU S, et al. Improvement method of high-temperature Digital Image Correlation measurement accuracy based on image processing [J]. Measurement, 2022, 190: 110723.

[9] LU N, YU L, WANG Q, et al. Fabrication of ultra-stable and customized high-temperature speckle patterns using

- air plasma spraying and flexible speckle templates [J]. *Sensors*, 2023, 23(17): 7656.
- [10] CUI Y, GUO Y Y, WANG C, et al. Improved image pre-processing method applicable to high-temperature Digital Image Correlation measurement[J]. *Optical Engineering*, 2024, 63 (5): 054101.
- [11] 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): 367-376.
- [12] 万士正, 常晓飞, 闫杰. 红外空空导弹气动光学传输效应分析方法[J]. *西北工业大学学报*, 2015, 33(4): 621-626.
- WAN S Z, CHANG X F, YAN J. Analysis method of aerodynamic optical transmission effect of infrared air-to-air missile[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33 (4): 621-626. (in Chinese)
- [13] 卢兰鑫. 大气湍流退化图像恢复算法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.
- LU L X. Research on image restoration algorithm of atmospheric turbulence degradation[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [14] CHAN R H, HO C, NIKOLOVA M. Salt - and - pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2007, 14(10): 79-85.
- [15] CONDURACHE D, CIUREANU I A. Baker-Campbell-Hausdorff-Dynkin formula for the lie algebra of rigid body displacements[J]. *Mathematics*, 2020, 8(7): 1185.
- (本文编辑: 刘圣晨)
-
-  第一作者: 毛承泷(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高温数字图像相关和数字图像处理。
-  通信作者: 高山(1986—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理以及复杂环境下的辐射测温技术。中国计算机学会协同计算专业委员会执行委员, 黑龙江省计算机学会物联网专委会委员, 中国造船学会高级会员。