

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.06

基于数字图像相关法的应变场测量系统 校准技术研究综述

程帅, 张大治*, 段小艳, 姜延欢

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了基于数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)的应变场测量系统的原理、应用场合及发展现状, 阐述了对该系统进行校准的必要性。介绍了四点弯曲校准法、单轴拉伸校准法、垂直加载校准法、散斑变换校准法等具有代表性的DIC应变场测量系统校准方法的原理, 从校准维度、校准范围、装置成本、装置复杂性、计量溯源性、测量不确定度等方面对比分析了各校准方法的优势与不足, 指出可通过改进传感器性能、优化测量光路、提升散斑质量等手段提升校准准确性。展望了基于DIC的应变场测量系统校准技术的发展方向, 指出未来应针对大变形场的可靠产生与复现、散斑图样的三维立体化、多种校准数据的有机融合等开展研究, 以进一步拓展应变场校准范围并降低测量不确定度。

关键词: 数字图像相关法; 校准; 应变场测量; 不确定度

中图分类号: TB93; TP212; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 03-0084-10

Review of calibration techniques for strain field measurement systems based on Digital Image Correlation method

CHENG Shuai, ZHANG Dazhi*, DUAN Xiaoyan, JIANG Yanhuan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper introduces the principle, application and development status of the strain field measurement system based on Digital Image Correlation (DIC), expounds the necessity of calibrating the system, and introduces the principles of representative calibration methods for DIC strain field measurement systems, such as four point bending calibration method, uniaxial tension calibration method, vertical loading calibration method and speckle transformation calibration method. The calibration dimension, calibration range, device cost, device complexity, metrological traceability and measurement uncertainty of various calibration methods are discussed, and the advantages and disadvantages of each calibration technology are compared and analyzed. It is pointed out that the accuracy of existing calibration methods can be improved by improving sensor performance, optimizing the measurement optical path, and enhancing the speckle quality. The development direction of calibration technology for strain field measurement systems based on DIC is discussed, and it is pointed out that future research should focus on the reliable generation and reproduction of large deformation fields, three-dimensional visualization of speckle patterns, and organic fusion of multiple calibration data to

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-05-12

基金项目: 国家“十四五”创新基金项目(JLJK2023001B003)

引用格式: 程帅, 张大治, 段小艳, 等. 基于数字图像相关法的应变场测量系统校准技术研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 84-93.

Citation: CHENG S, ZHANG D Z, DUAN X Y, et al. Review of calibration techniques for strain field measurement systems based on Digital Image Correlation method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 84-93.



further broaden the scope of application of strain field calibration and effectively reduce the uncertainty in the measurement process.

Key words: Digital Image Correlation; calibration; strain field measurement; uncertainty

0 引言

基于DIC的应变场测量系统是根据数字图像相关方法,通过处理被测对象表面变形前后的散斑图像直接获取其全场位移和应变分布的系统。基于DIC的应变场测量系统具有非接触、可实现全场测量、结构简单等优点,对测量环境和光源要求较为宽松^[1-5]。基于DIC的应变场测量系统能提供高精度、高分辨力的测量数据,为力学理论和有限元分析提供了有效的验证手段,已应用于航空航天、土木工程、材料科学等领域。目前,国内已有超过300套基于DIC的应变场测量系统,并以每年30~50套的速度增长。然而,基于DIC的应变场测量系统的校准规范尚未建立,缺乏系统性的校准和定标工作,因此现有的测量结果主要局限于趋势性分析,这在很大程度上限制了系统的工作效率和实际应用^[6-8]。

虽然基于DIC的应变场测量系统自20世纪80年代被提出以来得到了快速普及与发展^[9-13],但针对该系统的校准技术直到21世纪才开始被学者关注。2006年,美国密歇根州立大学联合瑞士、法国、英国等7个国家的11个组织联合开展了应变测量光学技术标准化项目(Standardization Project for Optical Techniques of Strain Measurement, SPOTS)^[14],该项目科研团队设计了一套基于四点弯曲梁的应变场校准装置,并研发了标准化的测试材料,以全面评估、验证复杂应变测量光学系统的适用性。此外,该项目科研团队还提出了一套详尽的分类系统,对测量过程中的各个环节进行细致分类,为应变测量系统中的组件及子系统制定了统一的诊断与测试方法。SPOTS的成功实施有力推动了基于DIC的应变场测量系统校准技术的发展,但该项目中提出的方法仅能实现小尺寸二维应变场的校准,存在一定局限性。

理论上,对基于DIC的应变场测量系统进行校准时,需借助其他成熟的应变场测量系统作为基准,同时使用这两种系统对同一应变场进行测量,

将二者的数据进行对比,得出校准函数,从而对基于DIC的应变场测量系统的测量值进行校正^[15-17]。寻找合适的应变场产生方式与应变场测量方法对实现基于DIC的应变场测量系统校准至关重要。应变场产生方式包括弯曲法、拉伸法、鼓膜法等,弯曲法通过对试样施加弯曲载荷使试样发生弯曲变形从而产生应变场,可分为三点弯曲法、四点弯曲法、悬臂梁法等;拉伸法通过将试样单轴进行拉伸从而产生应变场;鼓膜法通过向薄膜的一侧施加压力从而产生应变场。应变场测量方法可分为接触式与非接触式两大类。其中,接触式测量方法主要包括应变片阵列法、引伸计位移法等,这些方法通过物理接触直接获取应变信息;而非接触式测量方法则包含散斑干涉法、云纹干涉法、激光干涉法等,这些方法不依赖物理接触,而是通过光学或干涉原理间接获取应变数据。不同的基于DIC的应变场测量系统校准方法所使用的应变场产生方式与应变场测量方法不同,校准效果也存在差异。

本文首先论述校准基于DIC的应变场测量系统的必要性,然后综述近年来国内外研究者提出的基于DIC的应变场测量系统校准方法,从校准原理、装置复杂性、测量不确定度等方面进行分析与归纳,总结出各校准方法的特点,最后对基于DIC的应变场测量系统校准方法的未来发展方向进行展望,旨在为相关领域的科研工作者提供借鉴。

1 基于DIC的应变场测量系统

基于DIC的应变场测量系统由高速相机、专用光源、同步控制装置、标定样板以及图像分析软件等部分组成,如图1所示。通过相机采集试件变形前后的数字图像,利用相关计算获取感兴趣区域的变形信息。使用计算机对变形前图像中的感兴趣区域进行网格划分,将每个子区域视作刚性运动,再针对每个子区域,通过一定的搜索方法按预先定义的函数进行计算。在变形后图像中寻找与该子区域的互相关系数最大的区域,进而获

得该子区域的位移，对全部子区域进行计算，最终获得全场的变形信息。

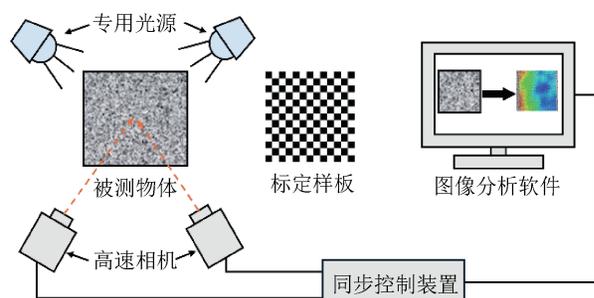


图1 基于DIC的应变场测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of DIC-based strain field measurement system

国内外典型的基于DIC的应变场测量系统如表1所示。同时，一些研究机构推出了功能强大的开源DIC软件，包括佐治亚理工学院开发的Ncorr软件、桑迪亚国家实验室开发的DICe软件、麻省理工学院开发的MultiDIC软件等。

尽管目前基于DIC的应变场测量系统已经较为成熟，但在位移和应变测量精度方面，该系统仍有优化空间^[18-20]。基于DIC的应变场测量系统高度依赖数字图像处理技术及相关算法，其测量结果的准确性受应变场产生方式、图像捕获质量以及相关算法的运算效果等多重因素影响，这些因素都可能导致实际测量中出现误差。众多科研工作者针对基于DIC的应变场测量系统的潜在误差来源进行了研究，并根据误差来源将误差划分为两大类：一类是与式样特性、载荷条件、图像采集质量相关的测量质量误差，另一类是与算法本身相关的原理性误差。尽管科研工作者已探索了减小

误差的策略，但这些误差尚未降低到可忽略不计的程度，特别是面对大型测量对象和极端应变条件时，测量误差尤为显著。因此，对基于DIC的应变场测量系统进行校准非常必要。

2 基于DIC的应变场测量系统校准方法

2.1 四点弯曲校准法

四点弯曲校准法是指通过四点弯曲法产生应变场，并以该应变场作为标准值，对基于DIC的应变场测量系统进行校准的方法。该方法以应变片测得的数据作为校准数据，并借助四点弯曲梁获得标准应变场，从而对基于DIC的应变场测量系统进行校准。

将条状试样平放于弯曲试验夹具中，形成简支梁形式，利用试样上方2个对称的加载点施加载荷，从而产生应变场。试样中间段的弯矩均匀分布，只需测量中间段某点的应变值，即可得到中间段的应变结果。该方法在应变场加载中得到了广泛应用，四点弯曲梁实物图如图2所示。



图2 四点弯曲梁

Fig.2 Four-point bending beam

表1 国内外典型的基于DIC的应变场测量系统

Tab.1 Typical DIC-based strain field measurement systems at home and abroad

系统名称	研发机构	位移测量误差 / pixel	应变测量误差 / $\mu\epsilon$
VIC-3D	美国 Correlated Solutions	± 0.005	± 10
ARAMIS	德国 GOM	± 0.005	± 10
StrainMaster	德国 LaVision	± 0.01	± 20
TEMA DIC	瑞典 Image System	± 0.01	± 50
XTDIC	西安新拓三维	± 0.01	± 20
PMLAB DIC-3D	东南大学	± 0.01	± 10

使用四点弯曲校准法时, 采用电阻应变片(又称电阻应变计)作为传感元件进行测量。使用适当的工业胶粘剂将应变片粘结在被测物体或材料的表面上, 导电元件的电阻随构件表面应变的变化而呈线性变化, 应变 ε 的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

式中: ΔR 为导电元件的电阻变化量, R 为原电阻。

2010年, 美国密歇根州大学机械工程系的 SEBASTIAN C 等人^[21]改进了 SPOTS 项目中的应变场校准装置, 利用应变片对基于 DIC 的应变场测量系统在四点弯曲试验过程中的测量结果进行校准。图 3 展示了 SEBASTIAN C 等人改进的应变产生装置中应变片的位置和参考坐标系。

图 4 为四点弯曲校准法装置示意图。将试样放置在四点弯曲装置中, 利用位移加载装置对试样施加压力, 从而得到试样侧面的二维应变场。将应变片放置在应变加载区域的上、下表面, 通过计算机或数字应变指示器实时读取加载过程中试样上、下表面的应变值。

文献[21]利用弹性理论描述了试样上、下表面的应变, 即

$$\varepsilon = \frac{v_{\text{avg}}}{6W^2} (ky + \eta) \quad (2)$$

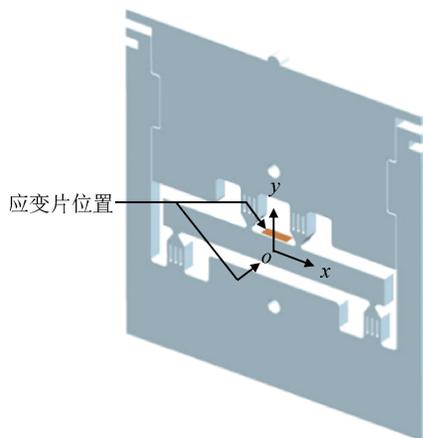


图 3 应变产生装置中应变片的位置和参考坐标系
Fig.3 Position and reference coordinate system of strain gauges in strain loading device

式中: k 和 η 为校正系数, W 为试样横梁的深度, v_{avg} 为对试样施加的位移。在加载过程中, 对试样施加 0.3 mm/min 的位移量, 并设定 DIC 系统每 2 s 记录一次图像。经计算机处理后, 选取位移分别为 27.5 、 110 、 $218 \mu\text{m}$ 时的数据, 得到被校系统测量应变场的结果, 并与应变片得到的结果进行比对, 得出 k 和 η 。文献[21]的实验结果表明: 当最大校准应变为 $120 \mu\varepsilon$ 时, 校准不确定度为 5% ; 当最大校准应变为 $1000 \mu\varepsilon$ 时, 校准不确定度为 1.4% 。

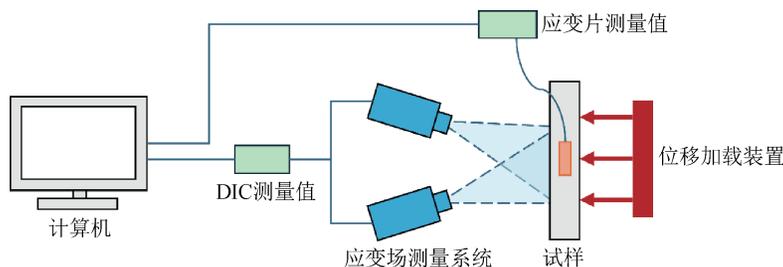


图 4 四点弯曲校准法装置示意图
Fig.4 Schematic diagram of four-point bending calibration device

2.2 单轴拉伸校准法

单轴拉伸校准法通过万能试验机对加工的狗骨型试样进行单轴拉伸, 产生均匀应变场, 并以该应变场作为标准值, 校准基于 DIC 的应变场测量系统。该方法采用引伸计测得的应变数据作为校准数据, 对基于 DIC 的应变场测量系统进行校准。

万能试验机实物图如图 5 所示。将试样固定在万能试验机的上、下夹头中, 依规定的速率对试

样进行拉伸, 使试样产生均匀的二维应变场。只要保证试样在拉伸阶段处于弹性变形阶段, 即可划定一块平面区域并认为该区域的应变为均匀应变, 采用其他测量手段对该区域进行应变测量, 即可得到该区域的应变结果。

引伸计是具备高分辨力与高准确度的应变测量装置, 不同于传统应变测试中常用的应变片, 他可以长期重复使用。2016年, 程百顺^[22]将基于



图5 万能试验机

Fig.5 Universal testing machine

DIC的应变场测量结果与引伸计测量数据对比,证明了基于DIC的应变场测量系统测量连续变形的有效性。2019年,李庆生等人^[23]将引伸计测量的焊接接头的应力-应变曲线与基于DIC的应变场测量曲线对比,结果表明两种测量方法得到的应力-应变曲线吻合较好,验证了基于DIC的应变场测量结果的准确性。2020年,斯洛文尼亚卢布尔雅那大学机械工程学院的PETER ZOBEC等人^[24]使用已知不确定度的引伸计作为校准器对基于DIC的应变场测量系统进行校准,修正单轴加载的狗骨试样表面的实际应变测量值,最大校准应变为5 000 $\mu\epsilon$ 时,校准不确定度约为1.5%。单轴拉伸校准装置示意图如图6所示。

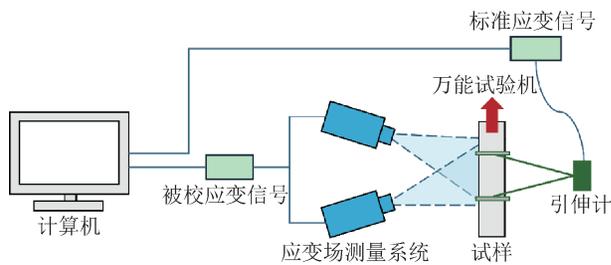


图6 单轴拉伸校准法装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of uniaxial tensile calibration device

2.3 垂直加载校准法

垂直加载校准法是指通过位移加载机构对试样垂直于测量平面的位置加载载荷,从而产生垂直于测量平面的三维应变场,并通过电子散斑干涉法(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)对应变场进行测量获得标准应变场,从而对基于

DIC的应变场测量系统进行校准的方法。ESPI是一种非接触式全场实时测量技术,具有通用性强、测量精度高、频率范围宽及测量简便等优点,近年来获得了快速发展^[25-26]。ESPI的测量结果可以溯源于激光波长,精度可达纳米级,高精度的ESPI应变测量结果可作为标准测量结果,用于校准基于DIC的应变场测量系统。

应用垂直加载校准法时,将长方形试样下端固定在加载架上,通过电动驱动器对试样进行加载,从而使试样产生均匀的应变场。只要保证试样处于弹性变形阶段,即可划定一块区域并认为该区域的应变为均匀应变,采用其他测量手段对该区域进行应变测量,即可得到该区域的应变结果。垂直加载机构如图7所示。

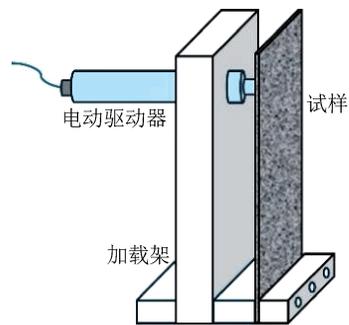


图7 垂直加载机构

Fig.7 Vertical loading mechanism

自21世纪开始,利用ESPI测量系统与基于DIC的应变场测量系统比对校准的方法受到了科研工作者的广泛关注。2013年,青岛理工大学的冯秀等人^[27]采用ESPI对基于DIC的应变场测量系统的离面位移测量精度进行验证,结果发现当被测量物体的离面位移大于4 μm 时,基于DIC的应变场测量系统精度与电子散斑干涉测量系统的精度相同。

2022年,东南大学的刘思梦^[28]通过ESPI对基于DIC的应变场测量系统的位移和应变测试结果进行分析,从而对基于DIC的应变场测量系统的测量结果进行修正。实验结果表明,在规范测试条件下,当变形量为1 000 $\mu\epsilon$ 时,基于DIC的应变场测量系统的应变测试误差在50 $\mu\epsilon$ 以下。垂直加载校准法装置示意图如图8所示。

2.4 散斑变换校准法

散斑变换校准法是一种新型的非接触式测量

校准方法，由英国拉夫堡大学的 BLENKINSOPP R 等人^[29]于 2019 年提出。通过计算机制作出符合基于 DIC 的应变场测量系统要求的黑白相间的二维散斑图样作为原始散斑图样，再通过软件对二维散斑图样进行拉伸处理，得到多种变形阶段下的二维应变散斑图样。通过基于 DIC 的应变场测量系统对变换前后的散斑图样进行测量，即可实现系统校准。散斑图样设计如图 9 所示。

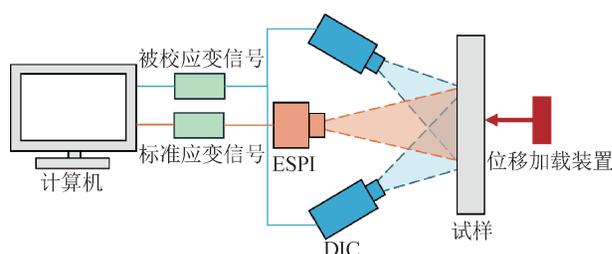
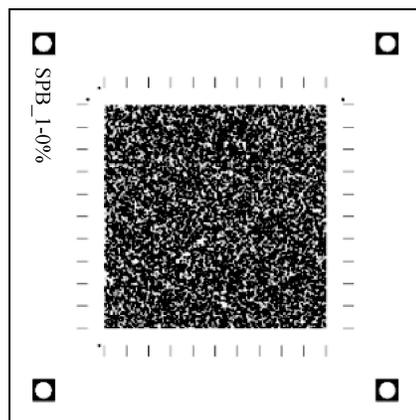
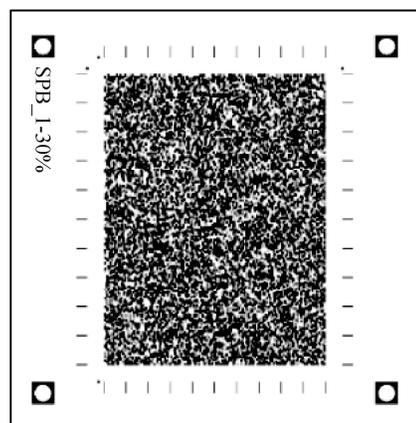


图 8 垂直加载校准法装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of vertical loading calibration device



(a) 应变为0%时的散斑图样
(a) Speckle pattern at 0% strain



(b) 应变为30%时的散斑图样
(b) Speckle pattern at 30% strain

图 9 散斑图样设计

Fig.9 Speckle pattern design

散斑变换校准法装置示意图如图 10 所示。BLENKINSOPP R 等人^[29]在创建并测量了应变 10% ~ 50% 的多个变形阶段后对结果进行了分析，每个变形阶段的测量平均值仅比校准平均值偏高 0.02%；在 95% 的置信区间内，典型测量误差为应变值的 -0.34% ~ + 0.34%；校准过程中测量的平均应变与期望应变的误差不高于 0.1%。

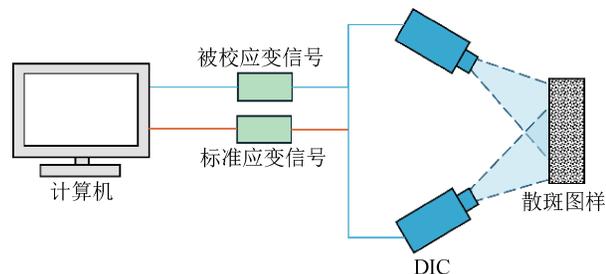


图 10 散斑变换校准法装置示意图

Fig.10 Schematic diagram of speckle transform calibration device

3 校准方法对比

3.1 应变场校准范围

应用四点弯曲校准法时，可通过大尺寸的四点弯曲装置以及加载机构，实现大范围的应变场测量。但该方法的测量受应变片测量条件的限制，只能对测量平面内单点进行测量，且应变片所能测量的应变范围通常被限制在整体应变量的 20% 以内。因此，四点弯曲校准法适用于二维平面内大尺寸、小应变条件下的校准。

应用单轴拉伸校准法时，可通过选取弹性模量较小的试样产生大应变，但是为了产生均匀的应变场，要求试样为长条形，这限制了应变场的校准范围。此外，该方法采用引伸计对应变进行测量，测量尺寸和测量精度受到限制，引伸计测量的位移最大只能达到试样拉伸的 50% 左右。因此，单轴拉伸校准法适用于二维平面内小尺寸、大应变条件下的校准。

应用垂直加载校准法时，只能测量激光照射范围内的应变变化情况，尽管可通过增加扩束镜的方法增大激光照射范围，但会造成回光强度减弱，导致测量误差增大。因此，垂直加载校准法适用于三维空间内小尺寸、小应变条件下的校准。

理论上，散斑变换校准法校准的应变场可为

很大测量平面,能够校准的应变值也很大。实际应用中,散斑变换校准法的效果主要受打印质量和散斑制备质量影响。因此,散斑变换校准法适用于二维平面内大应变、大尺寸条件下的校准。

3.2 装置成本与复杂性

四点弯曲校准法的加载方式较复杂,需要精确地控制加载点的位置和加载力的大小;所使用的夹持结构也较为复杂,需要确保加载过程中试样固定在支撑点和加载点之间,不发生滑移或偏移,复杂的压夹结构对装置的设计与制造提出了很高要求。此外,该校准方法采用应变片进行测量,需要在实验之前对应变片进行精确地标定和校准,粘贴时需确保应变片与被测物体表面紧密贴合,还需配备专用的应变采集器和应变分析仪,这些设备的精度和稳定性要求较高,需要定期进行维护和校准,也增加了装置的成本和复杂性。

应用单轴拉伸校准法时,需确保试样尺寸、形状、表面质量等符合试验要求。设计好试样之后,需要确保试样被稳固地夹持在试验机的上、下夹头中,试验过程中,需均匀、平稳地施加力,且无震动。此外,还需要控制试验机的加载速率和温度等条件,以确保试验结果的准确性和可重复性。安装和调试引伸计时,需要确保引伸计与试样的接触点干净、光滑,且夹持牢固,还需要对引伸计进行校准和调试,以确保其测量结果的准确性。相较四点弯曲校准法,单轴拉伸校准法的校准装置较为简单,成本也更为低廉。

垂直加载校准法的试样制备比较简单,但需要设计固定机构以保障试样的可靠固定。该方法采用的高精度电动驱动器和ESPI测量系统也增加了校准装置的成本。同时,由于使用的ESPI测量系统需要利用带有电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)的相机记录散斑图像,并通过计算机软件进行数字处理和分析,在测量过程中还要避免振动、温度变化、电磁干扰等对装置产生影响。这些因素都增加了垂直加载校准方法的复杂性。

散斑变换校准法通过对制备的散斑图板进行图像变换从而产生应变场,仅需考虑散斑打印和

设计过程,不需要额外引入测量装置和加载机构,与上述校准方法相比,散斑变换校准法的装置成本与复杂性最低。

3.3 计量溯源性与测量不确定度

四点弯曲校准法将应变的测量值溯源至电阻阻值。该方法的测量不确定度主要包括材料尺寸引入的不确定度、约束修正引入的不确定度、应变加载引入的不确定度、应变片测量引入的不确定度。应变片是应变场测量领域中应用最广泛的接触式测量装置,其测量精度较高,因此四点弯曲校准法的测量不确定度较小。

应用单轴拉伸校准法时,引伸计的触头与试件接触,试件的伸长间距变化会导致引伸计内部弹性元件的电阻改变,根据电阻的变化得出应变值,因此单轴拉伸校准法将应变的测量值溯源至电阻阻值。该方法的测量不确定度包括材料尺寸引入的不确定度、加载过程引入的不确定度、约束修正引入的不确定度、间距变化引入的不确定度、弹性元件自身特性引入的不确定度。与使用应变片的校准方法相比,使用引伸计校准的方法测量不确定度较大。

垂直加载校准法采用激光干涉技术实现应变场的测量,通过记录条纹图像来反映被测试件表面的微小位移,将应变的测量值溯源至激光波长。该方法的测量不确定度包括材料尺寸引入的不确定度、加载过程引入的不确定度、约束修正引入的不确定度、长度差测量时引入的不确定度、热膨胀系数差值引入的不确定度、温度波动引入的不确定度。在实际应用中,需要综合考虑这些不确定度因素,确保校准结果的准确性和可靠性。

散斑变换校准法通过测量散斑图样中打印像素的长度变化建立应变场,其核心步骤在于对每一个打印像素点的长度进行精确追踪和量化,通过这种方法获得的应变测量结果溯源至散斑的像素尺寸。散斑图版校准法的测量不确定度主要包括打印长度引入的不确定度、打印散斑像素引入的不确定度、图像变换引入的不确定度。

上述基于DIC的应变场测量系统校准方法对比如表2所示。

表2 校准方法对比

Tab.2 Comparison of calibration methods

加载方式	校准维度	校准范围	装置成本	装置复杂性	测量不确定度	计量溯源性
四点弯曲校准法	二维	小应变、大尺寸	高	高	较小	溯源至电阻阻值
单轴拉伸校准法	二维	大应变、小尺寸	较低	较低	较小	溯源至电阻阻值
垂直加载校准法	三维	小应变、小尺寸	较高	较高	小	溯源至激光波长
散斑变换校准法	二维	大应变、大尺寸	低	低	大	溯源至像素尺寸

4 总结与展望

介绍了基于DIC的应变场测量系统校准方法的原理及适用场景,阐述了近年来国内外研究者针对该领域的研究情况,总结归纳了各种校准方法的应变场产生方式、应变校准范围、计量溯源性以及测量不确定度,指出了各校准方法的优势与不足。未来可从以下个方面对基于DIC的应变场测量系统校准方法进行改进:①针对四点弯曲校准法与单轴拉伸校准法,在不改变现有溯源链条的前提下,可通过改进测量传感器性能、提升校准应变量值等方式降低测量不确定度;②针对垂直加载校准法,可通过设计大尺寸的应变场加载装置、优化测量光路等手段,扩展校准范围并提升校准准确性;③针对散斑变换校准法,可通过提升绘制的散斑图质量的方法降低测量不确定度。

未来针对基于DIC的应变场测量系统校准方法的研究将聚焦于3个核心方向:①通过选择合适的试样材料并设计优化加载装置,构建能够实现量值溯源的大尺寸变形场,以克服现有校准方法在大尺寸变形场校准方面的局限;②借助高清晰度显示器和全息成像技术,构建电子化和立体化的散斑图样,从而实现对三维应变场的精确校准;③将多种校准技术有机融合,在保证测量不确定度可控的同时,实现校准范围和校准量值的双重提升。通过更为深入的分析、优化以及对比试验,将多种校准方法的优势相结合,有望为基于DIC的应变场测量系统校准提供全新、综合的解决方案。

参考文献

[1] 程杰. 基于数字图像相关技术的应变测量初步研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
CHENG J. Preliminary study on strain measurement based on Digital Image Correlation technology [D]. Chengdu:

University of Electronic Science and Technology, 2022. (in Chinese)

- [2] 屈蓓, 付小龙, 何俊武, 等. 非接触式光学应变测量技术研究进展[J]. 计测技术, 2013, 33(5): 10-15.
QU B, FU X L, HE J W, et al. Progress of non-contact optical strain measurement[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(5): 10-15. (in Chinese)
- [3] PAN B, JIANG T W, WU D F. Strain measurement of objects subjected to aerodynamic heating using Digital Image Correlation: experimental design and preliminary results [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11).
- [4] 白晓虹. 数字图像相关(DIC)测量方法在材料变形研究中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
BAI X H. Application of Digital Image Correlation (DIC) measurements in the study of material deformation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- [5] 邵新星, 员方, 魏康, 等. 大型结构高精度三维动态变形测量应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 231-241.
SHAO X X, YUN F, WEI K, et al. Progress in the application of high-precision three-dimensional dynamic deformation measurement for large structures [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(8): 231-241. (in Chinese)
- [6] 刘阳. 三维数字图像相关方法误差分析与应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
LIU Y. Error analysis and application of three-dimensional Digital Image Correlation methods [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [7] 胡小亮. 数字图像相关方法的图像影响因素与应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
HU X L. Research on image influence factors and application of Digital Image Correlation method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [8] 李佳成, 叶敬晨, 计宏伟. 面向大变形测量的数字图像

- 相关方法的研究进展及应用[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 171-180.
- LI J C, YE J C, JI H W. Research progress and application of Digital Image Correlation methods for large deformation measurement [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 171-180. (in Chinese)
- [9] 高建新. 数字散斑相关方法及其在力学测量中的应用[D]. 北京: 清华大学, 1989.
- GAO J X. Digital scattering correlation method and its application to mechanical measurements [D]. Beijing: Tsinghua University, 1989. (in Chinese)
- [10] HILL B D. Calibration procedure for DIC strain measurements during vibration-based fatigue testing [D]. Logan: Utah State University, 2022.
- [11] WANG Y, LAVA P, COPPITETER S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an Erichsen test: methodology and validation [J]. Strain, 2013, 49(2): 190-198.
- [12] 池宇希, 杨昊天, 潘兵. 增量数字图像相关方法的误差分析及应用考量[J]. 力学与实践, 2023, 45(6): 1217-1226.
- CHI Y X, YANG H T, PAN B. Error analysis and application considerations of incremental Digital Image Correlation methods [J]. Mechanics and Practice, 2023, 45(6): 1217-1226. (in Chinese)
- [13] 郭忠光. 二维全场变形与应变测量方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- GUO Z Z. Research on two-dimensional full-field deformation and strain measurement method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] PATTERSON A E, HACK E, BRAILLY P, et al. Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 45(5): 550-564.
- [15] 陈新, 许巍, 何玉怀. 基于DIC的超高频振动疲劳试样动态全场应变测量方法[J]. 实验力学, 2021, 36(5): 677-685.
- CHEN X, XU W, HE Y H. Dynamic full-field strain measurement of UHF vibration fatigue specimens based on DIC [J]. Experimental Mechanics, 2021, 36(5): 677-685. (in Chinese)
- [16] 余镇江. 基于数字图像相关法的航空发动机叶片三维变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- YU Z J. Research on three-dimensional deformation measurement technology of aero-engine blade based on Digital Image Correlation method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] 武慧林. 基于多目视觉数字图像相关法的航空发动机叶片变形测量方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- WU H L. Measurement method of aero-engine blade deformation based on Digital Image Correlation method of multi-merit vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [18] PAN B, YU L, YANG Y, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-Digital Image Correlation [J]. Composite Structures, 2016, 157: 25-32.
- [19] BIN C, KATIC G, PAN B. Calibrating large-FOV stereo Digital Image Correlation system using phase targets and epipolar geometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 150.
- [20] SUTTON M A, TURNER J L, CHAO Y J, et al. Experimental investigations of three-dimensional effects near a crack tip using computer vision [J]. International Journal of Fracture, 1992, 53(3): 201-228.
- [21] SEBASTIAN C, PATTERSON E. Calibration of a Digital Image Correlation system [J]. Experimental Techniques, 2015, 39(1): 21-29.
- [22] 程百顺. 基于双目视觉的三维结构表面变形测量研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- CHENG B S. Research on surface deformation measurement of 3D structures based on binocular vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [23] 李庆生, 李志, 贺小华. 锆-钛复合板焊接接头局部力学性能研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(12): 1240-1248.
- LI Q S, LI Z, HE X H. Study on local mechanical properties of welded joints of zirconium-titanium composite plates [J]. Rare Metals, 2020, 44(12): 1240-1248. (in Chinese)
- [24] ZOBEC P, KLEMENC J. A simplified method for calibration of strain measurements using Digital Image Correlation [C]// Integrity-Reliability-Failure, IRF 2020, 7th International Conference, Funchal / Portugal, 2020: 235-244.
- [25] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾[J]. 航空制造技术, 2019,

- 62(14): 14-27.
- LIU S P, LIU F F, LI L G, et al. A review of the research progress of non-destructive testing and evaluation techniques for aerospace composites[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 14-27. (in Chinese)
- [26] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(3): 305-325.
- SHAO X X, CHEN Z N, DAI Y T, et al. Research progress on several key issues of Digital Image Correlation methods [J]. Experimental Mechanics, 2017, 32(3): 305-325. (in Chinese)
- [27] 冯秀, 陈旭, 徐楠, 等. 双目视觉DIC测量系统的离面位移测量精度[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 457-462.
- FENG X, CHEN X, XU N, et al. Accuracy of off-surface displacement measurement by binocular vision DIC measurement system [J]. Applied Optics, 2013, 34(3): 457-462. (in Chinese)
- [28] 刘思梦. 基于数字图像相关的力学参数测定及一致性分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- LIU S M. Research on mechanical parameter determination and consistency analysis based on Digital Image Correlation [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)

- [29] BLENKINSOPP R, ROBERTS J, HARLAND A, et al. A method for calibrating a Digital Image Correlation system for full-field strain measurements during large deformations [J]. Applied Sciences, 2019, 9(14). DOI: 10.3390/app9142828.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者:程帅(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光测量与校准。



通信作者:张大治(1977—),男,研究员,硕士生导师,主要研究方向为激光非接触动态测量与校准、振动与冲击计量校准。