

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.08.010

引用格式: 吴禹, 袁静, 王丽芳, 等. 数字图像相关法的量值溯源方法及计量校准装置[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(8): 111-122.



# 数字图像相关法的量值溯源方法及计量校准装置

吴禹<sup>1</sup>, 袁静<sup>1</sup>, 王丽芳<sup>1</sup>, 薛瑞<sup>2</sup>, 唐依文<sup>1</sup>

(1. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123; 2. 重庆机场集团有限公司, 重庆 401120)

**摘要:** 针对当前数字图像相关法存在校准方法缺乏系统性、量值溯源体系不完善的问题, 提出一种基于激光干涉测量技术的校准方法, 并结合自主设计局部变形测量光路系统实现精准测量。通过有限元数值模拟, 系统研究了拉伸荷载下应变板的应力刚化效应。基于理论分析与试验验证, 建立了环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型, 量化了应变板表面对流换热性能对应变测量结果的影响。通过引入阿贝误差补偿机制, 有效抑制了应变板拉伸过程中极微小弯曲变形导致的非线性误差。此外, 系统分析了测量过程中各影响量引入的标准不确定度分量及校准装置整体不确定度, 并完成了应变校准试验。结果表明, 所提出的基于激光干涉原理的数字图像相关法校准装置可将标准应变场的测量不确定度降低至 1.9%~0.83%。

**关键词:** 数字图像相关法; 应变; 量值溯源; 有限元法; 阿贝误差; 对流换热

中图分类号: O348.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)08-111-12

## Value traceability methods and metrological calibration devices for digital image correlation techniques

WU Yu<sup>1</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, WANG Lifang<sup>1</sup>, XUE Rui<sup>2</sup>, TANG Yiwen<sup>1</sup>

(1. Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, P. R. China; 2. Chongqing Airport Group Co., Ltd., Chongqing 401120, P. R. China)

**Abstract:** The digital image correlation (DIC) method currently suffers from inadequate systematic calibration methods and an underdeveloped metrological traceability system. To address these challenges, this study proposes a novel calibration methodology based on laser interferometry, integrated with a custom-designed optical system for local deformation measurements. Finite element simulations are employed to analyze the stress stiffening effect in strain plates under tensile loading. A coupled thermo-mechanical model is developed via theoretical analysis and experimental validation to quantitatively assess the influence of convective heat transfer on surface strain measurement accuracy. Furthermore, an Abbe error compensation mechanism is implemented to effectively mitigate nonlinear measurement errors induced by microscale bending during loading. A comprehensive uncertainty analysis is conducted to evaluate both standard uncertainty components and the overall measurement uncertainty. Experimental results demonstrate that the proposed calibration device reduces the uncertainty in

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2020jxj1X0004)。

Supported by Chongqing Research Institution Performance Incentive Guidance Special Project(cstc2020jxj1X0004).

作者简介: 吴禹(1989—), 男, 工程师, 主要从事力学计量方向研究,(E-mail)305651392@qq.com。

通信作者: 王丽芳, 女, 高级工程师, 硕士生导师,(E-mail)308207283@qq.com。

standard strain field measurements to the range of 1.9% to 0.83%, offering a critical advancement toward establishing a traceable calibration framework for DIC-based strain measurement systems.

**Keywords:** digital image correlation(DIC); strain measurement; metrological traceability; finite element analysis; Abbe error; convective heat transfer

数字图像相关法(digital image correlation method, DIC)是一种光学非接触式测量物体应变场的图像分析方法<sup>[1-2]</sup>,是基于双目视觉原理以被测对象的光学散斑图像为信息载体,通过处理变形前后的散斑图像直接获取全场位移和应变分布的系统。数字图像相关技术测量简单、对测量环境要求不高,自被提出以来得到了快速的发展和普及,广泛使用于航空航天、土木工程、材料科学等领域<sup>[3-4]</sup>。通过数字图像相关法测量透明件的全场位移,再利用光弹原理得到透明材料的转角场,又发展出了一种基于物体表面散斑图像灰度分析来获得物体变形特征量的数字梯度敏感法(digital gradient sensing method, DGS)<sup>[5]</sup>。

数字图像相关法作为力学理论和有限元分析的一种有效试验验证手段,具备高分辨力的位移或应变测量能力,但其测量结果的量值准确性与溯源性,还缺乏系统性的校准方法和溯源体系。目前,国内拥有超过300套基于数字图像相关法的应变场测量系统,但都缺乏必要的校准和定标,不能满足中国计量法制性的要求。且该设备的国内拥有量仍以每年30~50套的速度增长,但由于缺乏校准和定标,常只能用于趋势性分析,很大程度上限制了该设备的工作效率和应用场景<sup>[6]</sup>,目前其测量结果无法溯源至中国国家基准。

虽然数字图像相关法提出时间较早,但是直到2006年才有学者关注该设备的校准技术的研究。数字图像相关技术的测量精度,受计算效率、相关性算法、位移表征模式、材料表面散斑质量、数字散斑成像失真、透视误差与离面位移、2个数字相机的同步误差、环境等多方面因素影响<sup>[7-8]</sup>。国外研究者对3D-数字图像相关法的误差传递以及相机标定中的误差分析进行了研究<sup>[9]</sup>。多数研究学者将其测量误差主要归为两大类:一是关于测量方面引入的误差,二是与相关性算法、位移表征模式等关于计算原理方面的误差<sup>[10-12]</sup>。因此,需要综合考虑各个影响因素才能有效评判测量结果的准确性。理论上,最直接的综合评价方式就是利用其他成熟的测量技术制造出已知特征量的应变场<sup>[13-15]</sup>,同时,利用数字图像相关技术测量该同一应变场,并比较两者的测量结果,得到数字图像相关法的校准方程或标定系数,从而校正数字图像相关法的测量值。美国密歇根州大学 Sebastian 等<sup>[16]</sup>采用四点弯曲法进行了对基于数字图像相关法的应变场测量系统的校准试验,实验结果表明:应变校准点为  $120 \mu\epsilon$  时,校准不确定度为 5%,应变校准点为  $1000 \mu\epsilon$  时,校准不确定度为 1.4%。2020 年,Zobec 等<sup>[14]</sup>采用单轴拉伸校准法,利用已标定的引伸计作为计量标准对基于数字图像相关法的应变场测量系统进行了校准试验,应变校准点为  $5000 \mu\epsilon$  时,修正后的校准不确定度约为 1.5%。2022 年,刘思梦<sup>[13]</sup>采用电子散斑干涉法,对试样施加垂直于测量平面的位移荷载,并以此获得标准应变场。实验结果表明,在规范测试条件下,当试样变形量为  $1000 \mu\epsilon$  时,基于数字图像相关法的应变场测量系统的应变测量误差在  $50 \mu\epsilon$  以内。另外,还有利用不同变形阶段的散斑图样,通过对变换前后不同散斑图样进行测量的散斑变换校准法等。

四点弯曲校准法产生的应变场由应变片进行测量,并按照弹性力学理论计算出应变场内固定点位的应变值。由于受加载试样变形限制,其应变测量范围为小应变测量,并且该方法所使用的应变片只能以统计方法得到批次货品的平均性能,实际采用的应变片的灵敏系数存在偏差,导致使用该方法的校准试验精度较低。单轴拉伸校准法受引伸计测量标距和引伸计测量精度的限制,当测量标距较小时(10~50 mm),引伸计的分辨力对应变测量结果而言引入的不确定度分量较大,但是,如果选择较大标距(如 500 mm)的引伸计,那引伸计的测量精度最高只能选择 1 级精度,且引伸计在测量过程中受自重影响很大,因此,使用引伸计进行测量的单轴拉伸校准法的不确定度很难提高。采用电子散斑干涉法校准时,受激光照射范围的限制,仅适用于三维空间内小尺寸、小应变条件下的校准,并且试验受回光强度的影响,校准试验对现场测量条件和照射调试结果有较高要求;散斑变换校准法的不确定度主要取决于散斑打印质量和制备质量。该方法是基于参考位移场的相机参数标定方法,但未能解决应变量溯源问题。

对基于数字图像相关法的应变场测量系统的校准方法还处于探索阶段,还未建立系统的、标准的溯源体系。上述校准方法的测量不确定度对基于数字图像相关法的应变场测量系统而言仍然较大,未能满足被校仪器对应变量值测量结果的高精度溯源要求。

当前,其他校准方法无法生成较低不确定度的标准应变场,在拉伸应变板时环境荷载与材料非线性效应的影响机制也缺乏系统性研究,且需考虑由于微小弯曲变形引入的系统误差的补偿方法。针对上述问题,笔者提出“标准应变场生成-环境耦合作用下建模-系统误差补偿”的递进研究框架,旨在建立高精度的校准方法。具体而言,基于激光干涉测量技术,采用单轴拉伸法,结合自主设计光路系统实现对应变板局部变形高精度测量;通过有限元模拟,系统分析应变板初始微弯曲及应力刚化效应的影响;进一步通过理论分析与试验验证,建立环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型,并量化了应变板表面对流换热性能对应变测量结果的影响。研究发现,在线性镜组横向荷载、拉伸夹具非理想同轴和应变板非绝对平面等实际工况下,应变测量结果呈现出非线性特征,为此,设计了阿贝误差修正算法,有效抑制了拉伸过程中极微小弯曲变形导致的非线性测量偏差。最后,通过对校准试验过程中各影响量的系统分析,完成了校准装置测量不确定度的综合评定。

## 1 基于激光干涉原理对数字图像相关法的量值溯源的方法

依赖光波的干涉现象,对未知的单轴均匀应变场的变形量进行精密测量,测量示意图如图1所示。

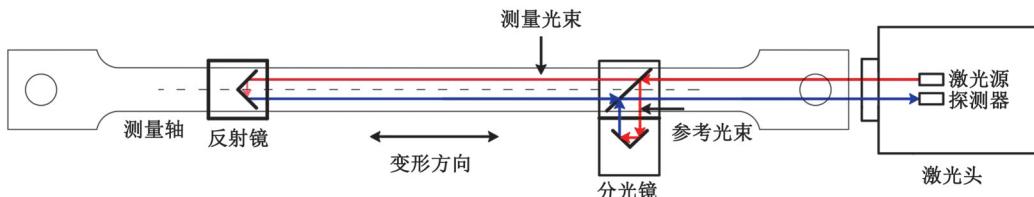


图1 基于激光干涉原理的轴向变形测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axial deformation measurement based on laser interference principle

设迈克尔逊干涉仪入射到光电探测器的2束线偏振光为 $E_1$ 和 $E_2$ ,两者的偏振方向相同,光频分别为 $f_1$ 和 $f_2$ ,这2束光可表示为

$$E_1(t)=V_1 \times e^{[i(2\pi f_1 t + \Phi_1)]}, \quad (1)$$

$$E_2(t)=V_2 \times e^{[i(2\pi f_2 t + \Phi_2)]}, \quad (2)$$

式中: $V_1$ 和 $V_2$ 为振幅; $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 为初位相; $t$ 为时间。

2束光波进行干涉后的信号强度为<sup>[17]</sup>

$$I(t)=\langle |E_1(t)+E_2(t)|^2 \rangle=V_1^2+V_2^2+2V_1V_2 \cos[2\pi(f_1-f_2)t+(\Phi_1-\Phi_2)]. \quad (3)$$

由式(3)可知,采用单频型干涉仪时,位移通过干涉信号的位相变化来测量。这里采用干涉技术进行位移(变形)测量时,在试样上标注的已知跨距两端精确地安装光学分光镜及干涉镜,利用激光光束通过前置分光镜,使各50%的光通过三面直角棱镜和反射镜,2束光将会根据走过的路径之差的波长数而发生干涉增强或相消。移动过程中反射镜移动了 $\delta$ 距离,光束路径增加了 $2\delta$ ,光电探测器上出现相继条纹数目等于路径变化对应的波长数 $N$ 。 $\delta$ 距离的计算公式为

$$\delta=N \times \frac{\lambda_0}{2}, \quad (4)$$

式中: $\lambda_0$ 为激光在真空中传播时的波长。

通过电子细分技术处理干涉仪输出的正交信号(两路相位差90°的干涉信号),结合高精度模数转换和数字信号处理,实现对干涉条纹相位周期的细分,从而实现对距离 $\delta$ 的测量分辨力达到0.1 μm。再根据应变的定义,由二维单轴向拉伸应变场试验标距两端位移变化量计算得到应变量值 $\varepsilon$ 。

$$\varepsilon=\frac{\delta}{L}, \quad (5)$$

式中: $\delta$ 为试验标距两端位移变化量, $\mu\text{m}$ ; $L$ 为单次试验测量中的试验标距, $\mu\text{m}$ 。

采用单轴拉伸法对专门设计的应变板进行拉伸,使应变板产生均匀的单轴向拉伸应变场。在应变板中间部位划定一块平面区域作为测量区段,通过设计的定位挂板,将光学测量镜组安装于挂板上,并定位在应变板划定的平面区域两侧,利用设计的激光光路截取其均匀应变场下的材料变形进行测量。根据圣维南原理,该测量方式可利用定位挂板避免应变板力边界区域应力梯度影响测量结果的准确性,由此,可截取近似均匀的单轴向应变场作为测量对象。在利用激光干涉现象对应变场进行测量并得到应变量值后,利用数字图像相关法测量该同一应变场,并比对两者的测量结果。最终,将数字图像相关法的位移或应变量值溯源至干涉光的波长。采用高性能氦氖激光器作为激光源,该激光标称波长为632.8 nm,稳频精度为 $0.05 \times 10^{-6}$ ,在材料变形的测量范围内,激光干涉技术引入的标准不确定度可达到 $0.1 \mu\text{m}$ 量级。数字图像相关法量值溯源方法示意图如图2所示。

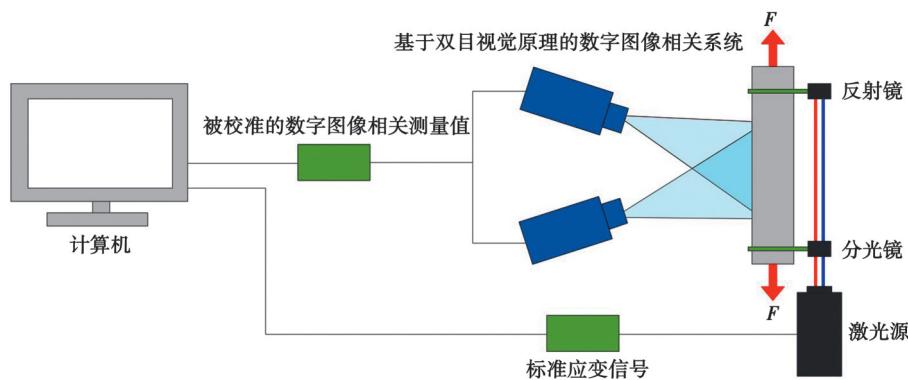


图2 数字图像相关法量值溯源方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DIC value traceability method

## 2 关于数字图像相关法的校准装置设计

应变量校准装置的设计原理图与试验照片如图3~4所示。该装置采用高精度滚珠丝杠带动移动横梁对应变板产生拉伸荷载,应变板上下两端分别设置万向铰接装置。使无附加力矩作用于应变板上。考虑应变板材料需要具备良好的应力-应变加卸载路径稳定性和应变时间稳定性,材料拥有较小的弹性滞后和弹性后效,故应变板选用40CrNiMoA合金钢材料。由于材料的晶体很微小<sup>[18]</sup>,而且是随机排列的,所以,在测量尺度远大于晶体尺寸的情况下,可认为测量的位移结果是包含无数多微小晶体随机排列时的宏观弹性,满足弹性力学的基本假设。

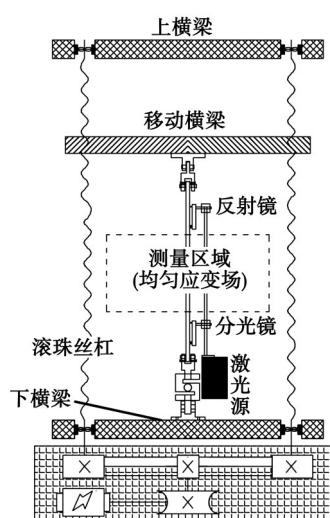


图3 应变量校准装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of strain calibration device



图4 应变量校准装置实物图

Fig. 4 Physical picture of strain calibration device

在安装激光器时,需要通过不断修正迭代的调光方法,运动轴在超过 1 m 的范围内通过不断调节,以减小激光光束与运动轴之间的未准直角度。

装置利用线性测量镜组可测量已知标距下的轴向拉伸变形,还可以利用转角测量镜组监测应变板的转角位移并对线性测量结果进行阿贝误差修正,从而减小了由于应变板平直度及拉伸力作用线与应变板中心线不同轴带来的测量误差。为了减小对应变量值的测量相对误差,专门设计了超长尺寸的应变板,由于加载系统拉伸空间和应变板长度尺寸设计较大,激光光路测量的均匀应变场范围较长,可以降低由于测量标距带来的不确定分量。应变板的设计参数如表 1 所示。应变板及定位挂板实物图如图 5~6 所示。

表 1 低蠕变、低滞后的金属材料应变板设计尺寸

Table 1 Design dimensions of strain plates for metal materials with low creep and low hysteresis mm

拉伸试样材料	总长度	试样平行长度测量部分			头部带承载 销孔直径	头部带过渡 部分半径	平面度及 平行度
		宽度	长度	厚度			
40CrNiMoA 合金钢	814	30	614	8	26	20	不大于 0.05

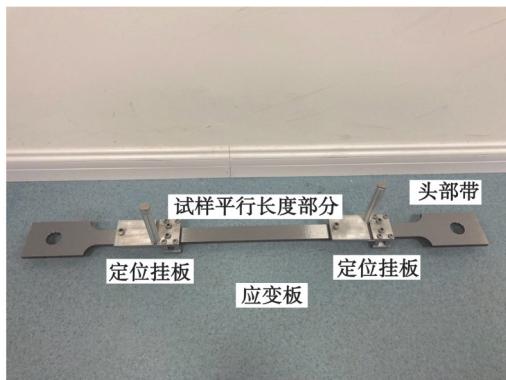


图 5 应变板实物图

Fig. 5 Physical picture of strain plate

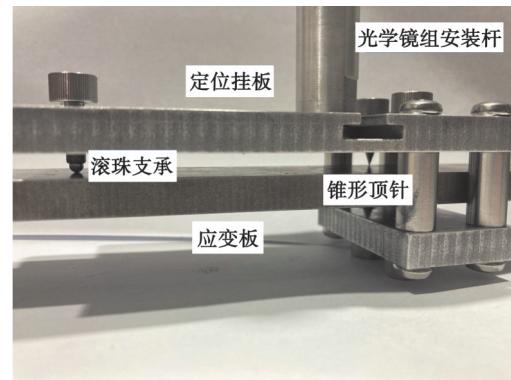


图 6 定位挂板实物图

Fig. 6 Physical picture of positioning hanging board

### 3 基于激光干涉原理的校准装置测量误差分析

#### 3.1 应变板初始微弯曲问题及拉伸荷载下的应力刚化效应

激光测量镜组及定位挂板在重力作用下,将在定位挂板顶针处产生与重力作用方向相反的静摩擦力,而由于力矩平衡,将在定位挂板滚珠支撑点产生垂直于应变板中面的横向荷载,应变板在拉伸前自由悬垂状态下将产生初始微弯曲。而在拉伸荷载作用下,由于应力刚化效应,应变板将恢复与上下拉头组件保持一条直线上。

基于有限元数值模拟该拉伸过程时,利用拉伸试验的对称性,建立了拉伸应变板的 1/2 模型(见图 7),在应变板中间对称面上施加垂直于中面的位移约束,在应变板端部与夹具接触部分的表面施加 y 轴方向的均布荷载,计算模型的单元类型选择 8 节点的 SOLID185 单元,共有单元数 208 295 个,计算节点 46 890 个。为了计算方便,拉伸穿销考虑为刚体,其与拉伸弹性体试件接触部分分别设置了接触对,以模拟加载的力边界条件。在数值分析求解过程中分为 2 个荷载步,分别用来模拟应变板受横向力作用及在横向力作用后大变形构型下的轴向拉伸阶段,求解过程中打开大变形开关。应变板头部带承载销孔与承载销接触部位应力云图如图 8 所示。



图 7 应变板 1/2 有限元模型

Fig. 7 Strain plate 1/2 finite element model

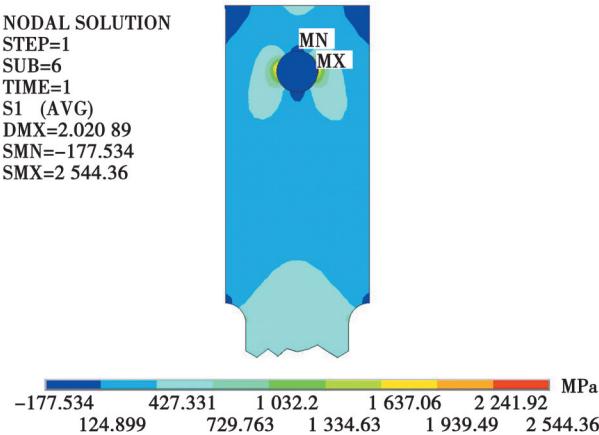


图8 应变板头部带承载销孔与承载销接触部位应力云图

Fig. 8 Stress cloud map of the contact area between the load-bearing pin hole and the load-bearing pin on the head of the strain plate

由图9~10可以看出,在横向力加载过程中,应变板发生横向弯曲,应变板跨中截面的挠度随荷载大致呈线性关系。随着轴向拉伸力的施加,由于应力刚化作用,应变板、附属拉伸连接组件(万向铰接装置等)以及力传感器组合的整体拉伸力传递链的横向刚度逐渐增大,跨中挠度随拉伸荷载作用快速减小。应变板端部拉伸轴向的位移量,也呈现出类似的规律,在轴向荷载施加初期,由于应力刚化效应,端部轴向位移发展迅速,其轴向位移主要为结构位移,然后,其轴向位移受应力刚化效应的影响逐渐减弱,表现出与轴向荷载的线性关系,该阶段的轴向位移主要由应变板的轴向变形产生。

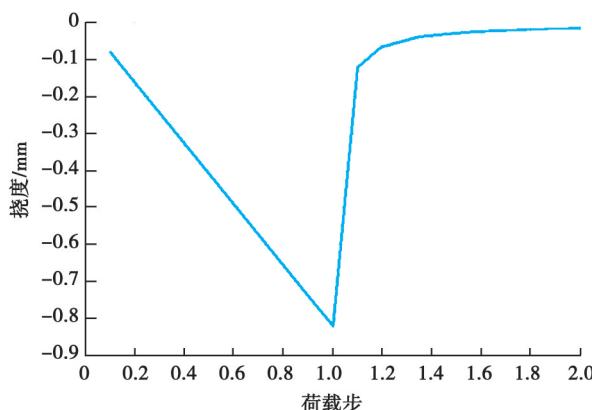


图9 应变板跨中挠度-荷载步曲线

Fig.9 Strain plate mid span deflection and load step curve

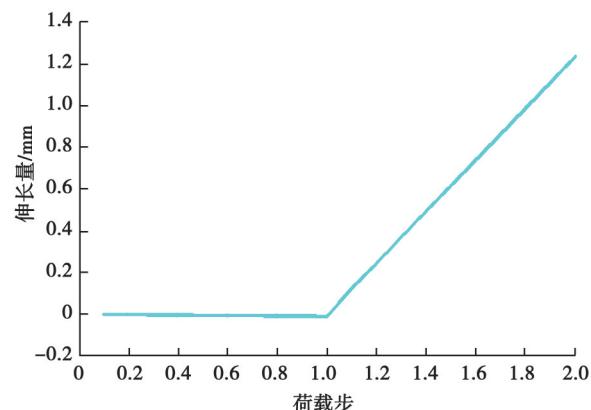


图10 应变板端部伸长量-荷载步曲线

Fig.10 Strain plate endpoint elongation and load step curve

在轴向拉伸荷载前10%的荷载步内,应变板前后两侧因横向弯曲产生的等值拉向、压向弯曲应变被快速恢复,在拉伸应变达到 $1000 \mu\epsilon$ 时,跨中截面前后两面的表面应变量值相差0.006%,应变板表面的轴向应变主要为轴向拉伸应变。在对数字图像相关法系统进行校准前,可提前施加满负荷的10%作为初始负荷,并以此作为校准前应变板的基准状态。

### 3.2 环境温度影响下对应变板拉伸变形测量的影响

#### 3.2.1 环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型

在每级分步加载时,横梁在丝杠持载下不会产生位移滑移,但因受环境温度波动的影响,应变板不仅会发生机械变形,还会产生温度变形。由此,提出考虑环境温度波动下的应变板热-力耦合变形模型(见图11)。

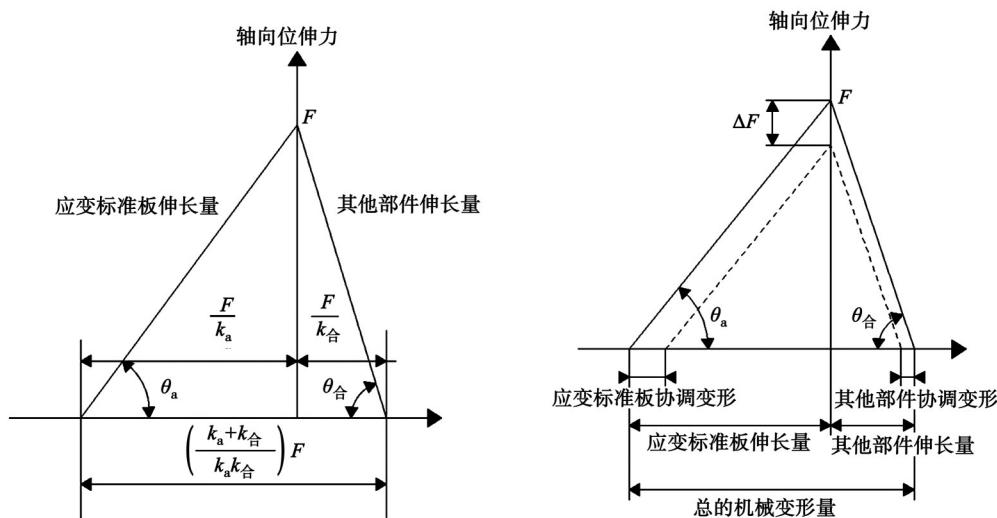


图 11 环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型图

Fig.11 Thermo-mechanical coupled deformation model of strain plate under environmental thermal loading

在进行力学拉伸试验时,在拉伸荷载作用下,电子式万能试验机的移动横梁、上、下专用拉伸连接组件、测力传感器及应变板都会产生轴向拉伸变形。由图 11 可知,图中横坐标代表闭合力系下整体的拉伸变形量,纵坐标代表闭合力系中轴向拉伸力。将试验机移动横梁的弯曲挠度变形、上、下专用拉伸连接组件、测力传感器的变形量看作整体,该整体变形量为

$$\Delta_{\text{合}} = \frac{F}{k_{\text{合}}} = \frac{F}{\tan \theta_{\text{合}}}, \quad (6)$$

$$k_{\text{合}} = \frac{k_b k_c k_d}{k_c k_d + k_b k_d + k_b k_c}, \quad (7)$$

应变板伸长量为

$$\Delta_a = \frac{F}{k_a} = \frac{F}{\tan \theta_a}, \quad (8)$$

式中:应变板的轴向拉伸刚度为  $k_a$ ;移动横梁的轴向抗弯刚度为  $k_b$ ;上、下专用拉伸连接组件的轴向拉伸刚度为  $k_c$ ;测力传感器的轴向拉伸刚度为  $k_d$ 。

在拉伸过程中,当环境温度发生变化,假设空间内某一点的环境温度波动量为  $T$ ,应变板材料的线膨胀系数为  $\alpha$ ,应变板由环境温度变化产生的变形量为  $\Delta_T$ 。因体系中不存在横梁位移滑移,体系的总位移不变。温度产生的变形量  $\Delta_T$  会替换原体系中部分的机械变形量,闭合力系中轴向拉伸力(机械荷载)由  $F$  会降低为  $F'$ ,被替换的机械伸长量会按照  $\theta_a$ 、 $\theta_{\text{合}}$  的大小协调变形。

环境温度波动  $T$  产生的温度变形量为

$$\Delta_T = \frac{F}{\tan \theta_a} + \frac{F}{\tan \theta_{\text{合}}} - \frac{F'}{\tan \theta_a} - \frac{F'}{\tan \theta_{\text{合}}}, \quad (9)$$

即

$$F' = F - \Delta_T \times \frac{\tan \theta_a \tan \theta_{\text{合}}}{\tan \theta_a + \tan \theta_{\text{合}}} \circ \quad (10)$$

闭合力系经过变形协调后,应变板前后机械伸长变化量为

$$\Delta_a - \Delta'_a = \frac{F}{\tan \theta_a} - \frac{F'}{\tan \theta_a} = \frac{\Delta_T \tan \theta_{\text{合}}}{\tan \theta_a + \tan \theta_{\text{合}}} \circ \quad (11)$$

### 3.2.2 环境温度荷载下应变板表面对流换热性能对测量结果的影响

实测校准装置各个部件的刚度,横梁及上组件拉头刚度为 70 922 N/mm,力传感器及下组件拉头刚度为

29 174 N/mm,应变板拉伸刚度 52 254 N/mm。参考其他文献资料查得 40CrNiMo 合金钢的热膨胀系数为  $11.34 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

假设 40CrNiMo 合金钢应变板材料变化  $0.246\ ^{\circ}\text{C}$ ,由温度变化产生的温度变形为  $2.235\ \mu\text{m}$ 。基于建立的环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型,温度产生的变形量会替换原先拉伸体系中部分的机械伸长量,闭合力系中轴向拉力  $F$  会降低,被替换的机械伸长量会按照横梁及上组件拉头刚度、力传感器及下组件拉头刚度、应变板刚度的大小进行协调变形。根据各部件实测刚度和热膨胀系数,经过计算可得:假设 40CrNiMo 合金钢应变板材料升高  $0.246\ ^{\circ}\text{C}$  条件下,横梁及上组件拉头变形量将减小  $0.467\ \mu\text{m}$ ,力传感器及下组件拉头变形量将减小  $1.135\ \mu\text{m}$ ,应变板的机械拉伸变形量会减小  $0.634\ \mu\text{m}$ ,叠加温度荷载下的温度变形量,应变板最终将伸长  $1.602\ \mu\text{m}$ ,轴向拉伸荷载将降低  $33.11\ \text{N}$ 。

设计在周期性环境温度荷载下测定应变板表面对流换热性能(设定平均温度变化速率为  $0.07\ ^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ),由校准装置给出拉伸荷载及 2 定位挂板标距  $255\ \text{mm}$  下的应变板变形量,以及由分辨力  $0.01\ ^{\circ}\text{C}$  的 ConST630 温度巡检仪测量得到周期性环境温度变化曲线如图 12 所示。

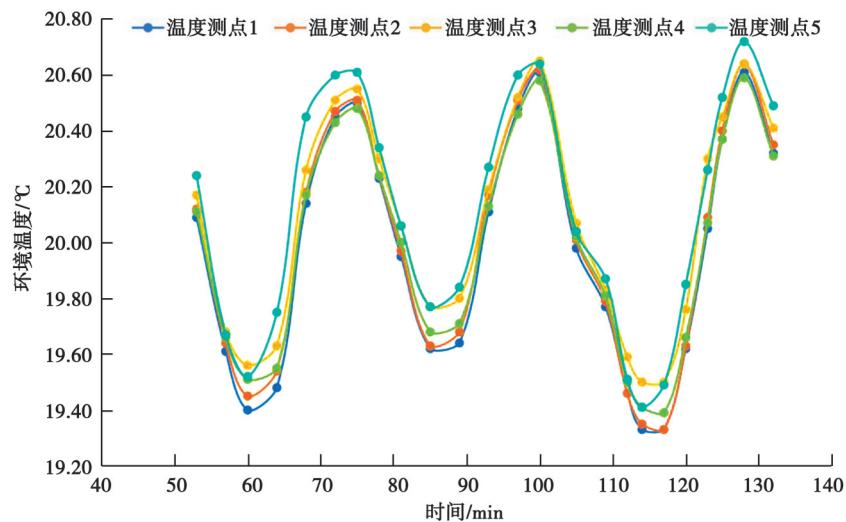


图 12 环境温度变化时间曲线  
Fig. 12 Time curve of environmental temperature change

根据周期性环境温度荷载下拉伸试验实测结果,在环境温度每升高或降低  $1\ ^{\circ}\text{C}$  情况下,拉伸荷载会降低或升高平均  $31.96\ \text{N}$ ;在  $255\ \text{mm}$  标距下测量,应变板在环境温度变化  $1\ ^{\circ}\text{C}$  下的平均变形量为  $0.509\ \mu\text{m}$ ,即对整个应变板而言,整体将伸长(升温条件下)或缩短(降温条件下) $1.597\ \mu\text{m}$ 。这与之前基于环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型,由各个部件实测刚度及 40CrNiMo 合金钢的热膨胀系数推算出的拉伸荷载变化量、应变板长度变化量的理论计算结果基本一致。由此,环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形模型得到验证。同时还能得知:因环境空气(流体)与上、下拉头组件和应变标准板(固体)表面之间进行热交换时,单位时间内的换热能力与固体表面和流体之间的温差、换热表面的形状、流体的流速等因素有关。根据试验测得结果可知,在本试验条件下,环境温度变化  $1\ ^{\circ}\text{C}$  时,应变板的材料温度变化仅为  $0.246\ ^{\circ}\text{C}$ 。

在实验室恒温环境条件下,校准装置附近 4 个温度测点在  $30\ \text{min}$  内最大波动度实测为  $\pm 0.09\ ^{\circ}\text{C}$ ,根据应变板表面对流换热性能,30 kN 拉伸荷载在该时间段内受环境温度影响产生的最大波动为  $\pm 2.98\ \text{N}$ ,应变板在  $717.6\ \mu\varepsilon$  拉伸应变下受环境温度影响产生的最大波动为  $\pm 0.18\ \mu\varepsilon$ 。

### 3.3 考虑阿贝误差的修正及残余阿贝误差

当测量光路与实际运动(位移)轴不重合时,线性镜子组若绕镜面中心存在微小转动,测量光路的光程即

会发生变化,而实际运动(位移)轴线并未发生变化。从而引起测量结果呈非线性的特征,该原因引入的误差称为阿贝误差。在试验中,因为定位挂板、线性镜组的横向荷载作用,上下拉伸夹具存在非理想同轴,应变板并非绝对理想平面(存在局部微小翘曲)等问题,故需要考虑对阿贝误差的修正。

使用激光干涉仪测量阿贝角时,其测量原理为:当角度反射镜与角度干涉镜发生相对旋转时,会导致角度测量的2束光的光程差发生变化,光程差由激光干涉仪的线性测量得出。该角度的测量不确定度主要由线性测量不确定度和2个反光镜之间的中心距公差。

由

$$\Delta x = l_{\text{Abbe}} \tan \alpha_{\text{Abbe}}, \quad (12)$$

可得

$$d(\Delta x) = \tan \alpha_{\text{Abbe}} d(l_{\text{Abbe}}) + \frac{l_{\text{Abbe}}}{\cos^2 \alpha_{\text{Abbe}}} d(\alpha_{\text{Abbe}}). \quad (13)$$

由此可看出,测量结果经过阿贝误差补偿后,其残余阿贝误差主要由两部分组成,一是由阿贝臂测量误差产生的残余阿贝误差,二是由阿贝角测量误差产生的残余阿贝误差,如图13所示。

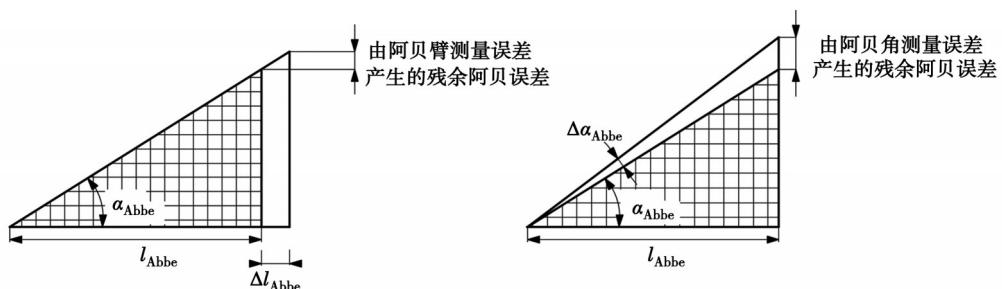


图13 残余阿贝误差分析

Fig. 13 Residual Abbe error analysis

通过计算可得,由阿贝臂测量产生的残余阿贝误差修正所引入的测量不确定度为  $U=0.024 \mu\text{m}(k=2)$ ,由阿贝角测量产生的残余阿贝误差修正所引入的测量不确定度为  $U=0.346 \mu\text{m}(k=2)$ ,其残余阿贝误差主要是阿贝角测量不准引起的,总的残余阿贝误差修正所引入的测量不确定度为  $U=0.3467 \mu\text{m}(k=2)$ 。

#### 4 校准装置的测量不确定度分析

装置测量数学模型如式(14)(15)所示,由于  $\delta$  与  $L$  彼此独立,且对式中各影响量求偏导数,可得测量不确定度传播系数。

$$c(\delta) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \delta} = \frac{1}{L}, \quad (14)$$

$$c(L) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial L} = \frac{1}{L^2}. \quad (15)$$

校准装置测量结果的不确定度分量来源如表2所示。

根据测量不确定度传播公式,可以导出应变量测量结果的合成标准不确定度为

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (16)$$

扩展不确定度为

$$U = k u_c, \quad (k=2), \\ U = 1.9 \sim 8.3 \mu\varepsilon \quad (100 \sim 1000 \mu\varepsilon, k=2). \quad (17)$$

表2 不确定度分量来源

Table 2 Source of uncertainty components

不确定度的来源		标准不确定度分量( $k=2$ )
力源	30 s 试验力负荷波动性/%	0.017
	应变标准板对中不同轴/%	0.006
应变板	应变板加工形位尺寸误差/%	0.06
	应变标准板材料弹性特性均匀性/%	0.04
应力刚化效应下应变板的弯曲应变/%		0.01
微位移测量	激光干涉仪测距误差/ $\mu\text{m}$	0.160 0
	光束路径与拉伸运动轴未准直/ $\mu\text{m}$	0.007 0
	残余阿贝误差/ $\mu\text{m}$	0.173 7
标距	光学测量镜组间标距刻线误差/ $\mu\text{m}$	25
	定位挂板针尖定位误差/ $\mu\text{m}$	173
环境温度波动	应变板表面对流换热性能/%	0.025
A类不确定度	(100 $\mu\varepsilon$ )/%	0.8
	(1 000 $\mu\varepsilon$ )/%	0.4

## 5 基于应变量校准装置的应变校准试验

通过机械拉伸对应变板施加荷载,利用安装于挂板上的线性测量镜组与转角测量镜组测量线性位移和转角变形,考虑对阿贝误差进行补偿,得到如表3所示的测量结果。试验采用的激光标称波长为632.8 nm,激光源稳频精度为 $5\times10^{-8}$ ,在预加载5 kN荷载下清零并作为校准起始点,2定位挂板锥形顶针跨距为255 mm。

表3 试验数据及应变量测量结果

Table 3 Experimental data and strain measurement results

试验力/N	线性位移/mm	阿贝角/( $''$ )	转角产生的位移量/mm	修正后的线性位移/mm	应变量/ $\mu\varepsilon$
0	0.000 0	0.0	0.000 0	0.000 0	0.0
5 000	0.039 3	0.8	0.001 6	0.037 7	94.2
10 000	0.078 3	1.3	0.002 6	0.075 7	188.8
15 000	0.117 1	1.7	0.003 4	0.113 7	283.4
20 000	0.156 0	4.8	0.004 2	0.151 8	378.4
25 000	0.194 4	2.3	0.004 6	0.189 8	473.1
30 000	0.232 2	2.2	0.004 4	0.227 8	567.9
35 000	0.269 8	2.0	0.004 0	0.265 8	662.6
40 000	0.306 8	1.6	0.003 2	0.303 6	756.8
45 000	0.343 1	0.9	0.001 8	0.341 3	850.6
50 000	0.379 2	-0.1	-0.000 1	0.379 3	945.5

## 6 结 论

针对单轴拉伸应变板标准应变场生成的关键技术问题展开研究,结果表明:1)在采用单轴拉伸应变板产生标准应变场进行校准试验时,需施加一定的初始荷载作为基准状态,且应变板几何尺寸设计应考虑应变板表面形貌特征对对流换热性能的影响;2)基于所建立的环境温度荷载作用下的应变板热-力耦合变形理论模

型,可定量表征环境温度波动下应变板表面对流换热性能对应变校准结果的影响;3)激光干涉测量中,通过引入阿贝误差补偿机制可有效抑制应变板极微小弯曲变形导致的非线性偏差。

基于激光干涉原理研制的数字图像相关法校准装置实现了  $U=1.9\sim8.3 \mu\varepsilon$ (测量范围:100~1 000  $\mu\varepsilon$ ,  $k=2$ ) 的测量不确定度,其技术优势体现在:1)采用变形量直接测量方式,规避了传统方法因材料弹性模量测定误差、应变片灵敏系数测定误差的影响;2)通过实时位移测量有效排除了材料蠕变以及接触边界应力梯度对应变测量结果的干扰。但需指出,为了保证应变测量结果的准确度,该方法需要在两光学元件之间设置较大的跨距,并且对应变板的形位加工精度及动态拉伸同轴度提出较为严格的前提条件,这导致装置调试过程需经历3~5次迭代式光路对准。

装置适用于二维平面大应变场景下的基于数字图像相关法的应变场测量系统的校准,有望对建立该测量系统的校准溯源体系提供参考。后续研究将重点优化光路对中调试的工作效率,并可以考虑双光路同时测量线性位移与转角位移,完成对应变测量结果的阿贝误差实时动态补偿,进一步提高对标准应变场的测量精度,并扩展至三维非接触式应变测量校准场景。

## 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 research on strain measurement based on digital image correlation technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [2] Valeri G, Koohbor B, Kidance A, et al. Investigating the tensile response of materials at high temperature using DIC[M]// Yoshida S, Lamberti L, Sciammarella C. Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics. Springer 2017, 3: 77-82.
- [3] 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. Ultra-high frequency vibration fatigue dynamic strain field measurement based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(5): 677-685. (in Chinese)
- [4] 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 3D-deformation mearmrnt techlnology of aero engine blade based on digital image correlation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] 陈德灯, 张蕊, 郭然. 高精度数字梯度敏感法测量PMMA板的转角场[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(5): 68-75.  
Chen D D, Zhang R, Guo R. Measuring angular deflections of PMMA by high-precision digital gradient sensing method[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(5): 68-75. (in Chinese)
- [6] 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.  
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. (in Chinese)
- [7] Chen B, Genovese K, Pan B. Calibrating large-FOV stereo digital image correlation system using phase targets and epipolar geometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 150: 106854.
- [8] 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.
- [9] Rohe D P, Jones E M C. Generation of synthetic digital image correlation images using the open-source blender software[J]. Experimental Techniques, 2022, 46(4): 615-631.
- [10] 蒋中宁, 罗远新, 王勇勤, 等. 数字图像相关位移场测量的误差补偿[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(12): 59-67.  
Jiang Z N, Luo Y X, Wang Y Q, et al. Error compensation of digital-image-correlation displacement field measurement[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(12): 59-67. (in Chinese)
- [11] 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. Research on the uncertainty analyse and applications of three-dimensional digital image correlation method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [12] 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. Reasearch on image influence factors and applications of digital image correlation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)

- [13] 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 measurement of mechanical parameters and consistency analysis by digital image correlation method[D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [14] Zobec P, Klemenc J. A simplified method for calibration of strain measurements using digital image correlation[C]// IRF 2020, 7th International Conference of Integrity-Reliability-Failure, Septemer 6-10, 2020, Funchal, Portugal. Porto, Portugal: INEGI, 2020: 235-244.
- [15] 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): 2828.
- [16] Sebastian C, Patterson E. Calibration of a digital image correlation system[J]. Experimental Techniques, 2015, 39(1): 21-29.
- [17] Skripal A V, Dobdin S Y, Inkin M G, et al. Measurement of distance by the maximum frequency of the interference signal with harmonic deviation of the wavelength of the self-mixing laser[J]. Technical Physics, 2024, 69(5): 1400-1406.
- [18] 张红英, 曾忠, 张鸿冰. 热变形参数对 40CrNiMo 钢组织的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(4): 32-34.
- Zhang H Y, Zeng Z, Zhang H B. Effects of hot deformation parameters on microstructure of 40CrNiMo steel[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(4): 32-34. (in Chinese)

(编辑 郑洁)