

基于视场分离的长标距高精度光学引伸计

陆润之, 朱飞鹏, 陶金, 顾剑, 白鹏翔, 雷冬

引用本文:

陆润之, 朱飞鹏, 陶金, 等. 基于视场分离的长标距高精度光学引伸计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2446–2451.

LU Run-zhi, ZHU Fei-peng, TAO Jin, et al. Long-gauge-length and high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2446–2451.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2446>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究

Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation
光学精密工程. 2018, 26(5): 1061–1069 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182605.1061>

高集成度小型化共心多尺度光学系统设计

Design of high integration and miniaturization concentric multiscale optical system
光学精密工程. 2020, 28(6): 1275–1282 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202806.1275>

厚度测量中对射激光束共线性视觉检测

Vision detection for laser beam collinearity in thickness measurement
光学精密工程. 2020, 28(8): 1690–1699 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1690>

高强钢薄板高温焊接变形的视觉测量

Visual measurement of high-temperature welding deformation for high-strength steel sheet
光学精密工程. 2020, 28(2): 283–295 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202802.0283>

同轴大压缩比大相对孔径相机的光学系统设计

Optical system design for coaxial camera with large compression and large relative aperture
光学精密工程. 2020, 28(8): 1651–1660 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1651>

文章编号 1004-924X(2020)11-2446-06

基于视场分离的长标距高精度光学引伸计

陆润之, 朱飞鹏*, 陶金, 顾剑, 白鹏翔, 雷冬

(河海大学力学与材料学院, 江苏南京 211100)

摘要:受相机分辨率的限制和离面刚体位移的影响,基于二维数字图像相关(2D-DIC)的光学引伸计的应变测量精度往往不高。为解决由相机分辨率不足而带来的问题,提出了一种视场分离装置,该装置利用一块直角棱镜与两块反射镜,将相机的连续视场分离成相隔一定距离的两个独立视场,大大增加了光学引伸计的标距,从而有效减小相机分辨率不足给光学引伸计带来的应变误差。此外,选取远心镜头成像以减少离面运动对 2D-DIC 引伸计的影响。最后,分别开展了静态实验和单轴拉伸实验来验证该引伸计的可行性。实验结果表明,应变结果的均方根误差都在 $6 \mu\epsilon$ 以内,基于视场分离的光学引伸计是一种高精度的应变测量技术。

关键词:数字图像相关;应变测量精度;光学引伸计;视场分离装置;标距

中图分类号:O348.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202811.2446

Long-gauge-length and high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting

LU Run-zhi, ZHU Fei-peng*, TAO Jin, GU Jian, BAI Peng-xiang, LEI Dong

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

* Corresponding author, E-mail: zhufei peng@hhu.edu.cn

Abstract: Limited by the resolution of the camera and the effect of rigid-body out-of-plane displacement, the strain measurement accuracy of an optical extensometer based on two-dimensional digital image correlation (2D-DIC) is often not high. To address the problem of insufficient camera resolution, a field-of-view (FOV) splitting device was proposed. The device used a right-angled optical prism and two mirrors to split the camera's continuous FOV into two independent fields separated by a certain distance. This device considerably increased the gauge length of the optical extensometer, thus effectively reducing the strain error caused by insufficient camera resolution. Moreover, a telecentric lens was adopted to reduce the effect of out-of-plane motion on the 2D-DIC extensometer. Static tests and uniaxial tensile tests were conducted to verify the feasibility of the proposed extensometer. Experimental results demonstrate that the root mean square errors of corresponding strain results are all within $6 \mu\epsilon$. The proposed optical extensometer based on FOV splitting is a high-accuracy strain measurement technique.

Key words: digital image correlation; strain measurement accuracy; optical extensometer; FOV splitting device; gauge length

收稿日期:2020-04-23;修订日期:2020-06-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11702082, No. 51679078);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2019B16514)

1 引言

应变测量是材料力学性能测试中不可或缺的一环,引伸计法凭借其高精确性广泛使用在应变测量中。引伸计大致分为接触式引伸计和非接触式引伸计^[1]。接触式引伸计包括利用齿轮杠杆将变形放大的机械式引伸计^[2],以及利用传感器将变形信号转化为电信号的电子引伸计。数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术,利用相机拍摄物体变形前后的散斑图像,再由相关匹配算法得到变形场,是当前实验力学领域广泛使用的一种非接触测量技术^[3-7]。目前,基于 DIC 技术的光学引伸计^[8]逐渐成为一种测量应变的实用方法。

使用单个相机的二维 DIC(2D-DIC)凭借其简单、便捷等特点而备受青睐^[9-11]。Sutton 等^[12]指出 2D-DIC 应变测量精度受离面位移的影响很大,而离面位移在实验过程中无法避免。利用远心镜头在景深范围内放大倍率恒定的特点,潘兵等^[13]采用远心镜头成像来减小离面位移对 2D-DIC 的影响,进而提高应变测量精度。Zhu 等^[14]提出了基于双反射镜成像技术的光学引伸计,消除了离面刚体位移对光学引伸计应变测量结果的影响。张敬敏等^[15]的研究表明光学引伸计的误差通常源自镜头焦距和外部震动。为解决三维 DIC(3D-DIC)中双相机不严格同步的问题,Shao 等^[16]提出了一种基于单相机的三维光学引伸计。

不论是基于 2D-DIC 还是 3D-DIC 的光学引伸计,通常会选取一个较大的标距,以获得较高的应变测量精度。然而,标距的上限必然受限于相机分辨率,导致光学引伸计的应变精度不高。因此,本文提出一种基于棱镜反射成像的视场分离技术,设计了相应的视场分离装置,并与远心镜头相结合实现了大标距、高精度的光学引伸计。

2 测量原理

基于 2D-DIC 的光学引伸计的工作原理如下:将表面布有散斑的试样夹持在加载系统上,用相机拍摄试样表面,在变形前图像中选取两个特征点 A 和 B,利用 DIC 算法跟踪变形过程中的这两个点,应变计算公式如下:

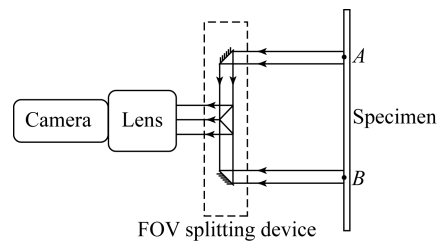
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{v_A - v_B}{l}, \quad (1)$$

其中: v_A, v_B 为 A, B 点的位移, l 为所取标距,单位为像素。式(1)中, v_A, v_B 的精度由 DIC 算法确定,因此应变测试精度与标距成反比。为得到较高的精度,通常取一个较长的标距,但标距不可能超过相机分辨率,这使得光学引伸计的应变精度受到了制约。

为解决引伸计标距不足的问题,本文提出了视场分离技术。如图 1 所示,该技术由一个直角棱镜和两面反射镜组成,其中棱镜的两个直角面均为反射面,两面反射镜分别平行于棱镜的两个反射面。由于远心镜头可降低试样离面位移的影响,将视场分离装置放置于远心镜头前,可将相机的单个连续视场分割成两个相隔一定距离的独立视场,从而达到提高引伸计标距的目的。图 1 中引伸计的应变计算公式为:

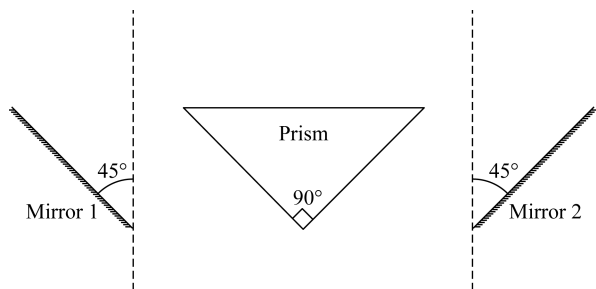
$$\epsilon = \frac{v_A - v_B}{l} = \frac{v_A - v_B}{l_{AB} + l_{gap}}, \quad (2)$$

其中: v_A, v_B 分别为两个独立视场中 A, B 点的图像位移, l 为两点图像的实际距离, l_{AB} 为 A, B 点之间的图像距离(小于相机分辨率), l_{gap} 为与两反射镜间距所对应的图像距离。由式(2)可知,利用视场分离技术可将标距 l 增大数倍,从而提高光学引伸计的应变测量精度。



(a) 光学引伸计构成

(a) Composition of optical extensometer



(b) 视场分离示意图

(b) FOV splitting diagram

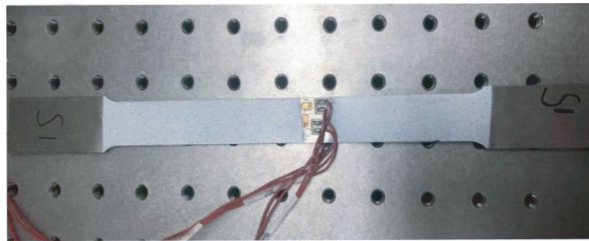
图 1 改进的光学引伸计测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement principle of improved optical extensometer

3 实验

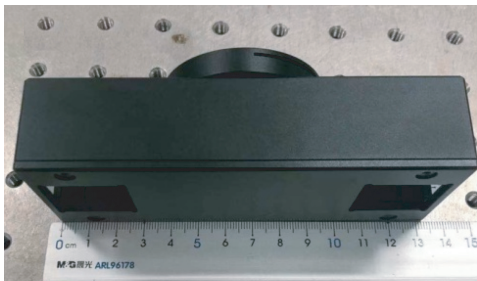
3.1 试样与实验设备

实验选取的不锈钢拉伸试样如图 2(a)所示,其中试样平行长度为 180 mm,横截面宽度为 20 mm,厚度为 0.95 mm。在试样中部粘贴了沿轴向布置的应变片。为了便于安装,对图 1(b)中 3 个元件进行合理设计和加工,安装成的视场分离装置如图 2(b)所示,其中双反射镜中心点之间的距离为 105 mm。2D-DIC 测量系统由分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$ pixel 的 CCD 图像传感器和 $0.25\times$ 的爱特蒙特远心镜头组成,该镜头畸变为 0.04% ,对测量结果的影响可忽略不计。



(a) 不锈钢拉伸试样

(a)Stainless steel tensile specimen



(b) 视场分离装置

(b)FOV splitting device

图 2 试样和改进装置

Fig. 2 Specimen and improved device

3.2 实验过程

图 3 为实验设备。将试样固定于试验机上、下夹具之间,然后将视场分离装置安装在远心镜头前端。使用激光进行光轴校准,使得相机光轴与试件尽量垂直,且将视场分离装置平行于试样放置,同时使相机上、下视场能够清晰成像。

共开展了两组实验,其一为静态实验,对未加载试样在使用视场分离装置前、后的状态下,以

2 frame/s 的速率分别采集一组时长为 30 s 的序列图像,研究引伸计的静态误差;其二为不锈钢试样的单轴拉伸实验,将基于视场分离的改进引伸计与应变片的测试结果进行对比。为验证重复性,在试样弹性阶段进行了 5 次重复的拉伸试验。实验初荷载为 0.4 kN,采集一幅图像作为参考图像,将应变仪读数清零,然后每加载 0.4 kN 采一幅图像,并记录下应变仪上的读数,直至 4.4 kN 结束实验。两组实验中光学引伸计选择相机上、下视场中两个点作为标距点,利用 2D-DIC 算法进行位移计算,图像子区大小为 51×51 pixel。

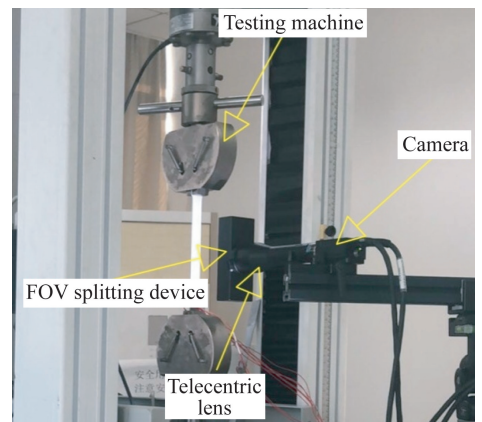


图 3 不锈钢拉伸实验设备

Fig. 3 Experimental setup for stainless steel tensile

4 实验结果分析与讨论

4.1 静态实验

为了利用视场分离式改进光学引伸计测得准确的应变值,必须对式(2)中的标距 l 进行精确标定。为此,将带有刻度的直尺与试样放置于同一平面内,并采集一幅标定图,如图 4 所示。图中尺子 30 mm 处的纵坐标为 95 pixel,41 mm 处为 926 pixel,120 mm 处为 1 122 pixel,132 mm 处为 2 029 pixel,上、下视场的放大倍率 M_1, M_2 分为:

$$M_1 = (926 - 95) / (41 - 30) = 75.5455 \text{ pixel/mm},$$

$$M_2 = (2\,029 - 1\,122) / (132 - 120) = 75.5833 \text{ pixel/mm}. \quad (3)$$

通过比例关系即式(4)算出式(2)中的图像距离 l_{gap} (M_1, M_2 的误差仅为 0.05% ,故取大值 M_2):

$$l_{\text{gap}} = (132 - 30)M_2 - (2\,029 - 95) = 5\,775 \text{ pixel}. \quad (4)$$

图 4 中上、下标距点分别取为 $A(1\ 215, 150)$, $B(1\ 215, 1\ 850)$, 二者在图像中的距离 $l_{AB} = 1\ 700$ pixel, 因此, 上、下标距点间的实际标距 $l = l_{AB} + l_{\text{gap}} = 7\ 475$ pixel.

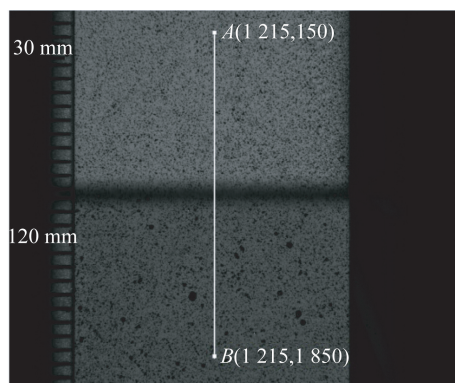


图 4 标距的标定图

Fig. 4 Calibration image for gauge length

根据式(1)和式(2), 分别对安装视场分离装置前、后的未加载试样图像序列进行应变计算, 得到的应变结果如图 5 所示。由于试样未施加荷载, 所以测得的应变值反映了静态误差。采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来定量评估测量方法的精度, 公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\epsilon_{\text{ext}} - \epsilon_{\text{th}})^2}, \quad (5)$$

其中: ϵ_{ext} 表示引伸计测量结果, ϵ_{th} 表示理论应变值, N 为测量点的个数。

从图 5 可知, 常规引伸计测得的应变值绝大多数在 $\pm 20 \mu\epsilon$ 内波动, 其均方根误差为 $12.88 \mu\epsilon$; 使用视场分离装置后的改进引伸计得到的应变误差基本都在 $\pm 5 \mu\epsilon$ 以内, 均方根误差仅为 $3.24 \mu\epsilon$, 表明标距的增大使改进后引伸计的静态误差减小至改进前的 $1/4$ 左右。DIC 算法对标距点 A, B 的位移计算精度约为 0.01 pixel, 引伸计标距由 $1\ 700$ pixel 增加到改进后的 $7\ 475$ pixel, 根据式(1)和式(2), 得到改进前、后的理论应变误差分别约为 $11.8 \mu\epsilon$ 和 $2.7 \mu\epsilon$, 与上述实验结果基本一致。静态实验的测量结果证实了基于视场分离技术的改进引伸计方法的可行性。

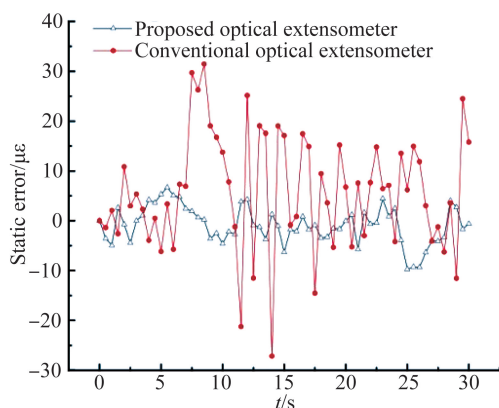


图 5 常规与改进引伸计的静态误差对比

Fig. 5 Comparison of static error between conventional and improved extensometer

4.2 单轴拉伸实验

在单轴拉伸实验中, 根据式(2)和 2D-DIC 算法, 计算得到基于视场分离技术的改进光学引伸计的轴向应变值。由于电测法精度极高, 因此将改进光学引伸计所得的应变值与应变片的结果作比较。图 6 为第一次拉伸实验中改进引伸计法和电测法得出的荷载-应变曲线及二者之间的应变误差, 可以发现两种方法的数据基本重合, 且随着荷载的增加, 应变近似呈线性增加。引伸计与应变片的最大误差为 $-4.01 \mu\epsilon$, 均方根误差为 $1.77 \mu\epsilon$ 。

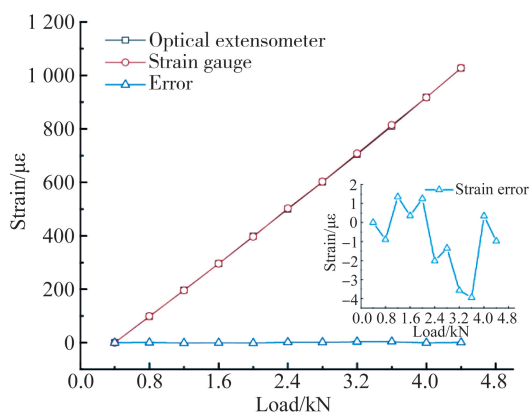


图 6 第一次拉伸实验中改进引伸计的应变结果

Fig. 6 Strain results of proposed extensometer in the first tensile test

然后, 对其余 4 次单轴拉伸实验进行同样的处理, 得到如图 7 所示的误差结果。表 1 为 5 次重复拉伸实验的误差统计结果, 第 1, 2 和第 5 次实验的均方根误差均小于静态误差 $3.24 \mu\epsilon$, 第 3

次实验误差略大于静态误差,5 次实验中改进引伸计和应变片结果的最大误差为 $9.88 \mu\epsilon$,最大均方根误差为 $6.08 \mu\epsilon$,二者都发生在第 4 次实验中,主要原因是该次加载过程中环境振动较大。单轴拉伸实验结果进一步验证了基于视场分离技术的改进光学引伸计具有很高的应变精度以及优异的重复性。

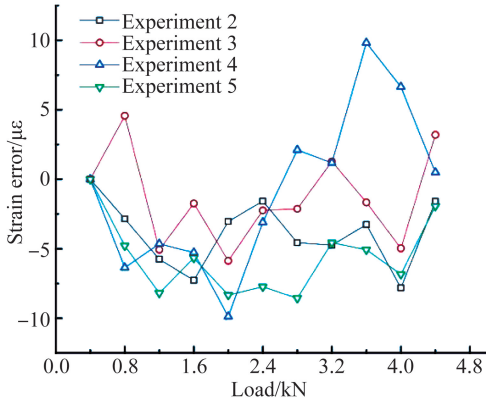


图 7 其余 4 次拉伸实验的误差

Fig. 7 Errors in remaining four tensile tests

表 1 五次重复实验中改进引伸计方法的应变误差统计

Tab. 1 Statistics of strain errors in five repeated tests obtained using optical extensometers (mm)

	1	2	3	4	5
均方根误差	1.77	2.56	3.53	6.08	2.88
最大误差	-4.01	-7.82	-5.07	-9.88	-8.56

根据应变计算公式(1),应变误差为 $\Delta\epsilon = (\Delta v_A - \Delta v_B)/l$,在位移计算误差一定的前提下,增大标距可有效降低应变测量误差。前面的实验结果都证明了增加引伸计标距可有效提高光学引伸计的应变测量精度,从而实现准确的应变测量。

参考文献:

- [1] SHAO X, EISA M M, CHEN Z, *et al.*. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30124-30138.
- [2] LU C W, YANG J. Development of a new differential extensometer [J]. *Journal of Geodesy & Geodynamics*, 2009, 2(1):77-80.

前文实验中远心镜头的放大倍率为 $0.25\times$,若选择更大倍率的镜头,如 $0.5\times$,可将图像距离 l_{gap} 增大一倍,进一步提高应变测量精度;且在更换镜头时,可将视场分离装置通过转接环与镜头连接,而不需要重新加工分离装置,非常便捷。值得注意的是,由式(3)结果可知,在安装视场分离装置时上、下视场并非完全平行,大的放大倍率表明该块视场越接近垂直于试样表面。理论上,需要对放大倍率不一致造成的影响进行修正。经修正,发现这一部分的影响只有 $1 \mu\epsilon$ 左右,因此为了计算方便,在本文研究中没有进行结果修正。此外,本文用视场分离技术只对轴向应变的测量精度进行了提高,然而这对确定材料的力学性能仍是不够的,因此,仍然需要发展一种能同时提高轴向和横向应变精度的高精度引伸计方法。

5 结论

本文针对光学引伸计应变测量精度受限于相机分辨率的问题,提出了一种基于分离视场技术的改进光学引伸计。利用直角棱镜与两面反射镜的合理布置,将标距提高至原来的 4 倍;并与远心镜头相结合,减小试样离面位移的影响,提高了基于 2D-DIC 光学引伸计的应变测量精度。基于上述引伸计,开展了不锈钢试样的静态试验和单轴拉伸实验。实验结果显示:在静态实验中,改进的光学引伸计可将应变的均方根误差由 $12.88 \mu\epsilon$ 降低至 $3.24 \mu\epsilon$,即将应变精度提高了 4 倍。5 次单轴拉伸实验结果表明,由改进引伸计得到的结果与电测法十分接近,均方根误差基本不超过 $6 \mu\epsilon$,最大误差不超过 $10 \mu\epsilon$,验证了基于分离视场技术的改进光学引伸计具有很高的应变测量精度。

- [3] 戴美玲,徐向阳,杨福俊,等. 薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 993-1000.
- DAI M L, XU X Y, YANG F J, *et al.*. Measurement of continuous deformation of a thin-walled sphere compressed by a rigid plate[J]. *Opt. Precision Eng*, 2016, 24(5): 993-1000. (in Chinese)
- [4] 唐正宗,梁晋,肖振中,等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2244-2253.

- TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.*. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. *Opt. Precision Eng*, 2010, 18(10): 2244-2253. (in Chinese)
- [5] NGUYEN H, KIEU H, WANG Z, *et al.*. Three-dimensional facial digitization using advanced digital image correlation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2188-2196.
- [6] HELFRICK M N, NIEZRECKI C, AVITABILE P, *et al.*. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(3): 917-927.
- [7] GRYTEN F, DAIYAN H, POLANCO-LORIA M, *et al.*. Use of digital image correlation to measure large-strain tensile properties of ductile thermoplastics [J]. *Polymer Testing*, 2009, 28(6): 653-660.
- [8] 张悦, 潘兵, 郭广平, 等. 接触式与非接触式引伸计应变和泊松比测量精度比较[J]. *实验力学*, 2018, 33(1): 59-68.
- ZHANG Y, PAN B, GUO G P, *et al.*. Comparison of measurement precision of strain and Poisson's ratio using contact and non-contact extensometer [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(1): 59-68. (in Chinese)
- [9] 汤海潮, 李大海, 李磊, 等. 基于数字图像相关的平面物体面形散斑图偏折术[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 192-198.
- TANG H CH, LI D H, LI L, *et al.*. Planar object surface shape speckle pattern deflectometry based on digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 192-198. (in Chinese)
- [10] 潘兵, 谢惠民, 夏勇, 等. 数字图像相关中基于可靠变形初值估计的大变形测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 400-406.
- PAN B, XIE H M, XIA Y, *et al.*. Large-deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 400-406. (in Chinese)
- [11] 杨勇, 王琰蕾, 李明, 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 197-201.
- YANG Y, WANG Y L, LI M, *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 197-201. (in Chinese)
- [12] SUTTON M A, YAN J H, TIWARI V, *et al.*. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757.
- [13] 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 105-115.
- PAN B, YU L P, WU D F, *et al.*. High-Accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 105-115. (in Chinese)
- [14] 朱飞鹏, 袁琰, 白鹏翔, 等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1061-1069.
- ZHU F P, GONG Y, BAI P X, *et al.*. Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation[J]. *Opt. Precision Eng*, 2018, 26(5): 1061-1069. (in Chinese)
- [15] 张敬敏, 王春华, 周巍松, 等. 视频引伸计的误差源解析[J]. *物理测试*, 2013, 31(3): 25-28.
- ZHANG J M, WANG CH H, ZHOU W S, *et al.*. Error analysis of video-extensometer [J]. *Physics Examination and Testing*, 2013, 31(3): 25-28. (in Chinese)
- [16] SHAO X, EISA M M, CHEN Z, *et al.*. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30124-30138.

作者简介:



陆润之(1996—),男,江苏无锡人,硕士研究生,2018年于桂林理工大学获得学士学位,主要从事光测力学方面的研究。E-mail: lurunzhi@yeah.net

通讯作者:



朱飞鹏(1983—),男,江苏盐城人,副教授,硕士生导师,2005年、2011年于东南大学分别获得学士、博士学位,主要从事光测实验力学与数字图像处理方面的研究与应用。E-mail: zhufeipeng@hhu.edu.cn