

# 激光与光电子学进展

## 视场分离式光学引伸计的改进与实现

朱飞鹏\*, 顾剑, 陆润之, 陶金, 白鹏翔, 雷冬

河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100

**摘要** 针对现有视场分离技术在实现过程中存在的复杂调节问题,提出了一种基于双斜方棱镜成像的视场分离方法,并形成一种高精度光学引伸计。该方法在简化调节步骤的同时,能够将引伸计的标距提高数倍,并与远心镜头结合,减少离面位移对二维数字图像相关(2D-DIC)的影响。分别开展了单轴拉伸实验和连续加载-卸载实验来验证该方法的可行性和准确性。实验结果表明:该方法得出的应变与电测法结果非常吻合,应变均方根误差均不超过  $3 \mu\epsilon$ 。因此所提出的基于双斜方棱镜的视场分离式光学引伸计是一种易于安装集成的高精度应变测量技术。

**关键词** 测量; 应变测量精度; 数字图像相关; 光学引伸计; 斜方棱镜; 远心镜头

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2312002

## Improvement and Realization of Field-of-View Splitting Optical Extensometer

Zhu Feipeng\*, Gu Jian, Lu Runzhi, Tao Jin, Bai Pengxiang, Lei Dong

College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China

**Abstract** Regarding the complex adjustment problem in the field-of-view(FOV) splitting, a FOV splitting scheme using dual rhombic prisms is proposed, and a high-accuracy optical extensometer is constructed. This scheme can not only simplify the adjustment steps of FOV splitting, but also increase the gauge length of extensometer by several times, and effectively reduce the effect of out-of-plane displacement on two-dimensional digital image correlation (2D-DIC) by adopting a telecentric lens. Uniaxial tensile test and continuous loading-unloading test were carried out to verify the feasibility and accuracy of the proposed method. The results show that the strain obtained by this method is in good agreement with those obtained by the strain gauge, and the root mean square error of the strain results is no more than  $3 \mu\epsilon$ . Therefore, the FOV splitting optical extensometer based on the dual rhombic prisms proposed in this paper is an easy-to-implement high-accuracy strain measurement technique.

**Key words** measurement; strain measurement accuracy; digital image correlation; optical extensometer; rhombic prism; telecentric lens

**OCIS codes** 120.3940; 100.2000

### 1 引言

为了确定材料的基本力学性能,精确的应变测量至关重要。目前最常用的接触式引伸计<sup>[1]</sup>应变测

量方法,在测试过程中易损坏试样,且量程也有一定限制,不适用于大变形的检测。光学(视频)引伸计通过相机跟踪试样表面的两个标距点,得到两点间的平均应变,具有非接触和大量程的测量优势,

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-03-16; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51679078)、中央高校基本科研业务费专项资金(B210202095)

通信作者: \*zhufeipeng@hhu.edu.cn

成为目前科学研究和工程技术领域一种广泛应用的测试手段<sup>[2-3]</sup>。

基于二维数字图像相关(2D-DIC)技术<sup>[4-5]</sup>的光学引伸计尽管操作原理简单,但不可避免受到离面位移影响和相机分辨率的限制。Bai等<sup>[6]</sup>和Pan等<sup>[7]</sup>利用刚性参考样本作为外部补偿消除了离面位移影响。Lü等<sup>[8]</sup>提出了一种基于坐标变化的视频引伸计补偿法。Zhu等<sup>[9-11]</sup>研究出基于双45°反射镜成像技术的光学引伸计,可自行补偿由离面刚体位移引起的测量误差。Dong等<sup>[12]</sup>建立了改进双反射辅助视频引伸计,准确测定了碳纤维丝的力学性能。Pan等<sup>[13]</sup>证实了双侧远心镜头可减小离面位移对2D-DIC的影响。Shao等<sup>[14]</sup>提出了一种基于棱镜和两面反射镜成像的单相机三维光学引伸计,既不受离面位移影响,又可解决三维DIC中双相机同步问题。在此基础上,Zhu等<sup>[15]</sup>提出一种基于三元件反射成像技术的视场分离式光学引伸计,大大提高了标距,并与远心镜头相结合,实现了高精度应变测量,不足之处在于三元件的光路调节过程较为繁琐,难以确保每面反射镜完全平行于直角棱镜反射

面。Chen等<sup>[16]</sup>提出一种结合双侧远心成像系统和立方棱镜折射原理的双视场视频引伸计,测得实时、高精度的纵向应变。

针对现有三元件视场分离装置中存在的反射镜平移、同角度旋转、异角度旋转等<sup>[15]</sup>调节繁琐问题,本文提出一种基于双斜方棱镜的视场分离式光学引伸计,减小了反射镜调节繁琐引起的安装误差,应变精度可提高到八倍,而原有的三元件光学引伸计只提高到四倍,从而实现了高精度应变测量。

## 2 测量原理

### 2.1 改进引伸计的工作原理

鉴于已有工作中三元件视场分离装置存在的反射镜调节繁琐问题,设计了如图1(a)所示的改进视场分离技术。该技术采用两个尺寸相同的斜方棱镜,将上、下棱镜对称布置在壳内,其中每个棱镜的两个斜面都相互平行,试样表面发出的光线通过壳体上、下两端未被遮挡区域,成像到相机靶面上,得到不连续的上、下双视场的成像效果。将上述视场分离装置放置于远心镜头前,以减小离面位移影响。

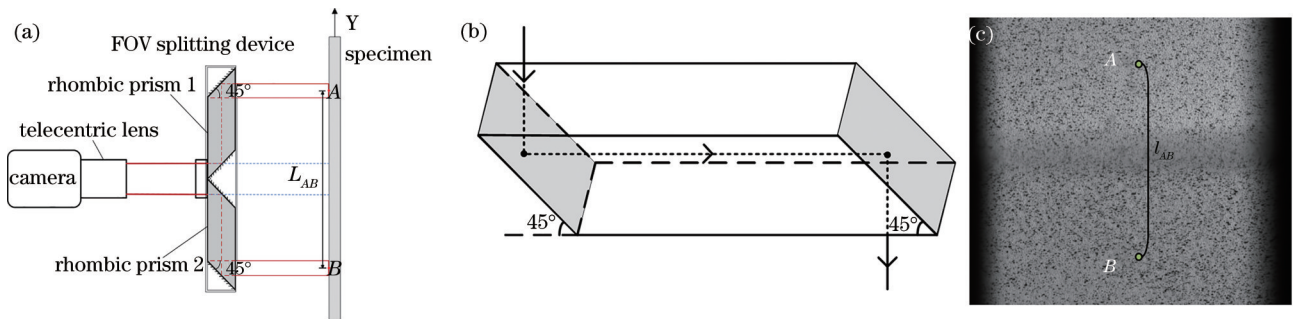


图1 测量原理。(a) 光学引伸计的构成; (b) 斜方棱镜示意图; (c) 相机采集图

Fig. 1 Measurement principle. (a) Construction of optical extensometer; (b) schematic diagram of rhombic (c) image recorded by camera

图1(b)为斜方棱镜的示意图,其左、右两个阴影斜面为相互平行的45°抛光镀膜反射面,上、下为两个经抛光处理的透光面。试样的某标距点的入射光线穿过棱镜透光面,依次到达两个反射面进行二次反射后,平行出射到远心镜头中,在传播过程中光线方向未发生改变,只是发生了一个平移。因此,如图1(a)所示,利用两个相同且对称放置的斜方棱镜,可将试样表面较远的两个标距点发出的光线平移至较近的距离,并成像到相机中,实现双视场图像记录,得到如图1(c)所示的上、下两个独立视场的图像。

该技术将原有三元件方式<sup>[15]</sup>改成了两个元件,

可大大简化视场分离装置的调节过程,进一步增大光学引伸计标距,达到了提高应变精度的目的。

图1中所示基于双斜方棱镜的视场分离式光学引伸计的应变可以表示为:

$$\epsilon = \frac{V_A - V_B}{L_{AB}} = \frac{v_A - v_B}{l_{AB} + l_{grp}} = \frac{v_A - v_B}{l_0} \quad (1)$$

式中, $V_A$ 、 $V_B$ 为标距点真实位移, $L_{AB}$ 为A、B点的实际距离,以毫米为单位;图像上的位移 $v_A$ 、 $v_B$ 对应于真实位移 $V_A$ 、 $V_B$ , $l_{AB}$ 为A、B点的图像距离, $l_{grp}$ 为两个视场之间的图像距离, $l_0$ 为A、B点的实际图像距离,以像素为单位。根据(1)式可知,如果引伸计的标距从1500 pixel增大到9000 pixel,那么应变测量

精度将提高到六倍。

### 2.2 标距标定

由(1)式,必须预先知道  $l_{gap}$ ,才能计算应变。 $l_{gap}$  的理论值  $l_{th}$  可由(2)式得出,然而元件加工和安装误差会使得  $l_{th}$  与实际值有所偏差,因此需通过标定实验来确定距离  $l_{gap}$ 。

$$l_{th} = \frac{KL_{gap}}{p} \quad (2)$$

式中, $K$ 为远心镜头的无量纲放大倍数, $L_{gap}$ 为两个视场之间的距离, $p$ 为相机像素尺寸。

如图 2 所示,在两个不连续的视场 FOV1 和 FOV2 边缘附近分别选取两个已知刻度点 C、D 和 E、F,可分别得到上下视场的放大倍率  $k_1$  和  $k_2$  (以 pixel/mm 作单位)。根据刻度与像素坐标的比例关系,可由(3)式和(4)式分别求出两个视场距离  $l_{gap}$ :

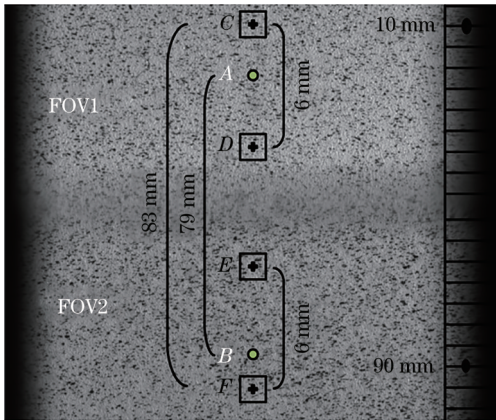


图 2 标距的标定

Fig. 2 Calibration of gauge length

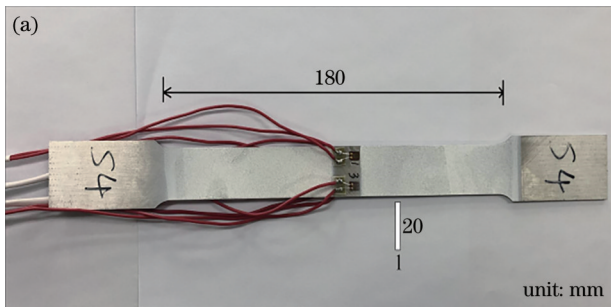


图 3 试样与镜头。(a) 不锈钢拉伸试样; (b) 0.5X 远心镜头

Fig. 3 Specimen and lens. (a) Stainless steel tensile specimen; (b) 0.5X telecentric lens

根据(2)式,可以得出两个独立视场的理论距离  $l_{th} = 2 \times 35 \times 0.5 / (3.45 \times 10^{-3}) \approx 10145$  pixel, 其中 35 mm 为棱镜两反射面的距离,0.5X 为远心镜头放大倍率,3.45  $\mu\text{m}$  为 CCD 像素大小。根据(3)、(4)式,可得两个视场距离  $l_{gap}$  分别为 10167.5 pixel 和 10153.7 pixel,最大相对误差为  $(10167.5 - 10145) /$

$$l_{gap} = k_1 L_{CF} - l_{CF} = \frac{l_{CD}}{L_{CD}} L_{CF} - l_{CF} \quad (3)$$

$$l_{gap} = k_2 L_{CF} - l_{CF} = \frac{l_{EF}}{L_{EF}} L_{CF} - l_{CF} \quad (4)$$

式中,  $L_{CD}$ 、 $L_{CF}$ 、 $L_{EF}$  为两点间的真实距离,以毫米为单位,可由刻度尺读出;  $l_{CD}$ 、 $l_{CF}$ 、 $l_{EF}$  分别对应于  $L_{CD}$ 、 $L_{CF}$ 、 $L_{EF}$ ,以像素为单位,由图像像素坐标得到。

根据式(3)式和(4)式可得到两个  $l_{gap}$  值,通常选取两者中的较大值,因为  $l_{gap}$  数值越大,说明相机越垂直于试样表面<sup>[15]</sup>。

在实验图像上,选取标距点 A、B,形成改进光学引伸计,其标距由式  $l_0 = l_{AB} + l_{gap}$  得到。

## 3 实验过程

### 3.1 试样与实验设备

实验选用如图 3(a)所示的不锈钢拉伸试样,在其中部粘贴两个沿轴向的应变片,图 3(b)为 0.5X 的远心镜头。CCD 相机分辨率为 2448 pixel  $\times$  2048 pixel,像素大小为 3.45  $\mu\text{m}$ 。为简化视场分离技术,对图 1 所示的视场分离光路进行设计、加工和集成,得到如图 4 所示的视场分离装置实物图,装置外壳尺寸为 104 mm  $\times$  44 mm  $\times$  21 mm,上、下透光区域为 15 mm  $\times$  15 mm,单个斜方棱镜的两面反射镜相距 35 mm,尺寸均为 15 mm  $\times$  21 mm。如图 4(c)所示,壳体内部有一 100 mm  $\times$  15 mm  $\times$  15 mm 的凹槽,放入两个斜方棱镜后,再借助侧面的胶头紧定螺丝固定在凹槽中。如图 4(a)所示,通过后端螺纹将视场分离装置直接连接到镜头前。

$10145 = 0.2\%$ ,因此可取  $l_{gap} = 10167.5$  pixel。标定结果充分表明改进视场分离装置具有较高的安装精度和便于安装的优异特点。

### 3.2 实验过程

实验装置如图 5 所示,安装试样,将视场分离装置和远心镜头连接到 CCD 上。调节镜头光圈至最

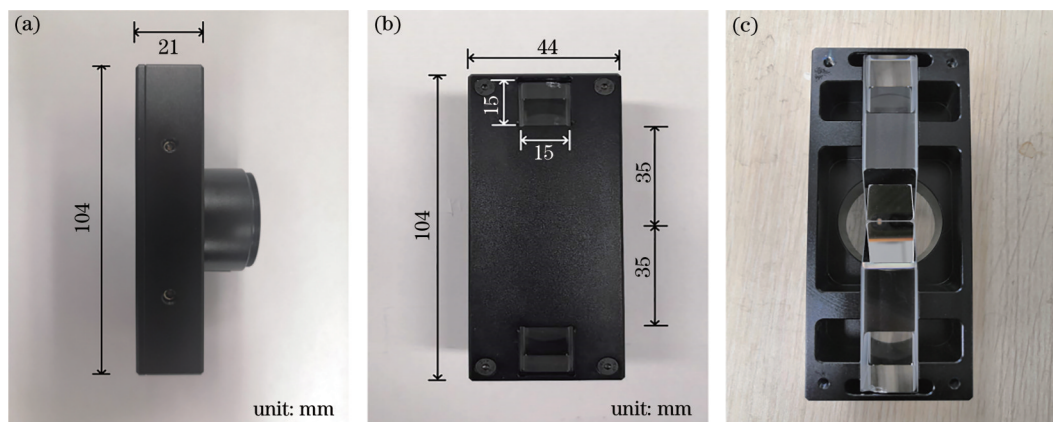


图 4 改进视场分离装置图。(a) 侧视；(b) 正视；(c) 内部

Fig. 4 Improved FOV splitting device diagram. (a) Side view; (b) front view; (c) inner view

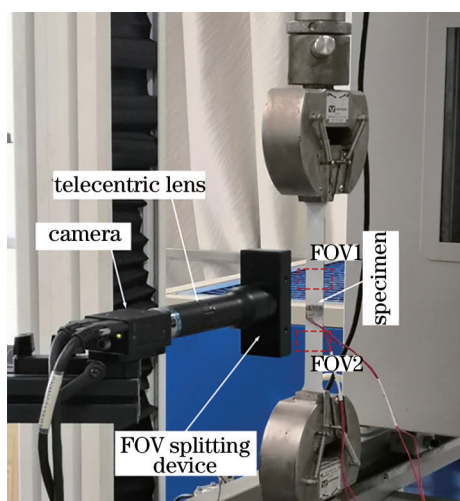


图 5 实验设备

Fig. 5 Experimental setup

大,使得景深最小;调整三脚架,使得相机上下视场同时清晰成像,表明相机光轴近似垂直于试样表面;最后调节光圈至合适位置。视场分离装置与试样表面距离约 65 mm。通过相机记录上、下两个视场,以虚线方框表示。

为了验证改进装置及引伸计的可行性和应变精度,共开展了两类实验,其一为单轴拉伸实验,比较改进引伸计与电测法测量结果,估算测量误差;首先给试件施加 300 N 初始荷载,将应变仪读数清零,并采集一幅参考图像,然后以 300 N 增量逐级施加荷载,在每级荷载下,采集一幅图像,并记录下应变仪读数,直至 4200 N 加载结束。为验证实验的重复性和稳定性,将上述实验重复了八次。其二为连续加载-卸载实验,试验机位移率为 0.3 mm/min,相机采集帧率为 1 frame/s,在试验机开始加载的同时,相机同步采集图像,保证了试件荷载和变形一

一对应;本试验初始荷载仍为 300 N,共进行了三个周期,记录下 360 幅图像。

## 4 实验结果分析与讨论

### 4.1 单轴拉伸实验

在单轴拉伸实验中,选取计算点如图 2 中 A、B 所示, $l_{AB}=1400$  pixel, $l_0=l_{\text{gap}}+l_{AB}=11567.5$  pixel,改进前、后的标距分别为 1400 pixel 和 11567.5 pixel,理论上应变误差可下降至改进前的 1400/11567.5=1/8.3。利用二维 DIC 算法对两类实验进行位移计算,子区大小为 71 pixel×71 pixel。图 6(a)为第一次实验中改进引伸计和电测法测得的轴向应变-荷载曲线以及二者之间的应变误差,从图中可明显发现,两种方法的应变结果非常吻合,且最大误差仅为 2.53  $\mu\epsilon$ 。

然后,对其余七组实验也采用类似的处理过程。图 6(b)为均方根误差(RMSE)结果,其中应变平均误差为 0.45±1.09  $\mu\epsilon$ (取八次结果中均值和均方根误差的平均值)。由表 1 可知,第二组和第七组实验的应变误差相对偏大,其中最大误差为 3.58  $\mu\epsilon$ ,最大均方根误差为 1.38  $\mu\epsilon$ ,可能是实验中的环境震动所致。改进光学引伸计与电测结果最大相对误差为 0.39%。由于二维 DIC 的位移精度约为 0.01 pixel,因此根据(1)式可估算出改进引伸计的最优应变精度约为(0.01+0.01)/11567.5=1.73  $\mu\epsilon$ ,与上述分析基本一致。实验结果表明,本改进引伸计具有较高的测量应变精度以及可行性。

### 4.2 连续加载-卸载实验

在图 2 上视场中,选取标距点 C、D 形成常规光学引伸计,标距为  $l_{CD}=878$  pixel,改进引伸计标距仍

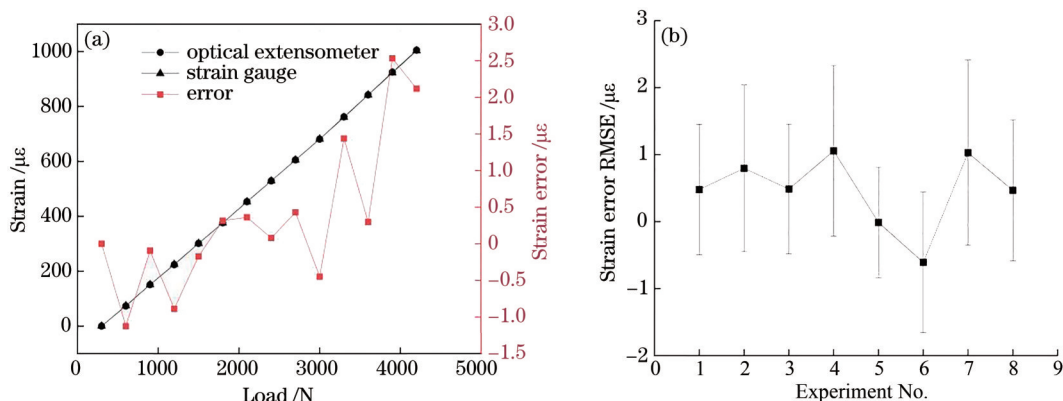


图 6 试样应变结果。(a) 第一次实验中改进引伸计的轴向应变;(b) 八组实验的均方根应变误差

Fig. 6 Strain results of specimen. (a) Axial strain of the proposed extensometer in the first test; (b) RMSE of strain errors in the eight tests

表 1 八组重复实验中改进引伸计方法的应变误差统计值

Table 1 Strain error statistics of proposed extensometer in eight repeated tests

	1	2	3	4	5	6	7	8
Maximum error / $\mu\epsilon$	2.53	3.58	2.05	2.22	1.78	1.02	3.11	2.13
RMSE / $\mu\epsilon$	0.97	1.24	0.97	1.27	0.82	1.05	1.38	1.05

为  $l_0=11567.5$  pixel。图 7(a)、图 7(b)为常规引伸计、改进引伸计与电测法之间的应变-时间曲线。图 7(a)中,常规引伸计的应变波动幅度较大,均方根误差为  $39.57 \mu\epsilon$ ,最大的应变误差达到了  $66.9 \mu\epsilon$ ,其所能达到的应变精度约为  $(0.01+0.01)/878=22.8 \mu\epsilon$ ,出现偏差的主要原因是试验机上、下夹头未严格对中所致的离面转动引起了测量误差。图 7(b)中,改进引伸计应变结果相对较平

滑,与电测法结果非常吻合,均方根误差为  $2.93 \mu\epsilon$ ,最大相对误差为  $0.81\%$ ,未能达到理论  $1.73 \mu\epsilon$  的主要原因来自于连续加载过程中难以避免的环境震动。总之,不论单轴拉伸实验还是连续加载-卸载实验都验证了基于双斜方棱镜的改进引伸计具有良好的稳定性和重复性。因为远心镜头畸变很小,且试样弹性阶段的变形较小,因此对测量结果的影响可忽略不计。

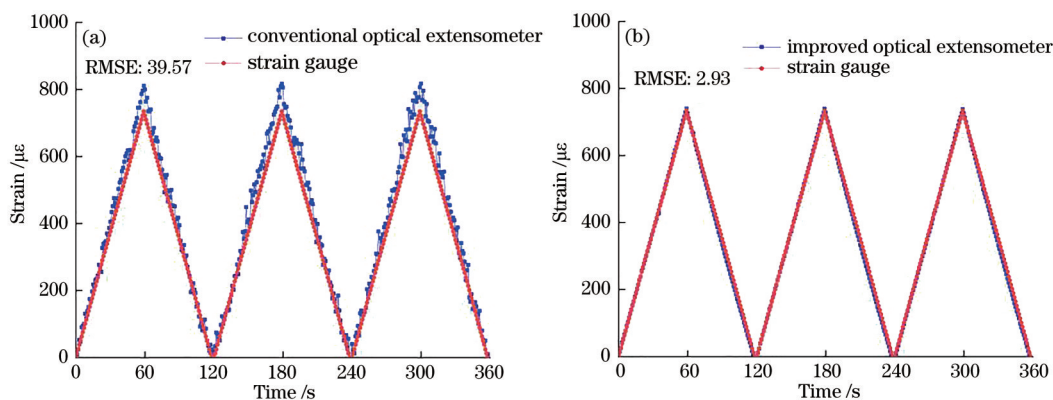


图 7 测得的应变-时间曲线。(a) 常规光学引伸计;(b) 改进光学引伸计

Fig. 7 Measured strain-time curve. (a) Conventional optical extensometer; (b) improved optical extensometer

与现有三元件视场分离引伸计<sup>[15]</sup>相比,所提出的基于双斜方棱镜的二元件形式安装更为简单、易于集成,但也存在视场分离距离固定不可调的缺点,需更换不同尺寸的斜方棱镜或不同倍率的远心镜头,才可实现不同应变精度的测量需求。

## 5 结 论

为解决已有视场分离技术存在的不足,提出了一种基于双斜方棱镜成像的视场分离技术,并对光路进行设计、加工和集成,实现了一个视场分离硬

件装置;将该装置与远心镜头配合,形成了一个长标距、高精度光学引伸计,将标距大小由 1400 pixel 增至 11567.5 pixel,提高了光学引伸计的应变测量精度,应变误差可下降到  $1400/11567.5 \approx 1/8.3$ 。基于该引伸计,分别开展了不锈钢试样的单轴拉伸实验和连续加载-卸载实验,两类实验中改进引伸计所得应变结果与电测法结果几乎一致,均方根误差均小于  $3 \mu\epsilon$ ,充分验证了改进视场分离方案的可行性,由此形成的光学引伸计具有很高的精度。

### 参 考 文 献

- [1] Tabin J, Prącik M. Methods for identifying dynamic parameters of clip-on extensometer-specimen structure in tensile tests[J]. *Measurement*, 2015, 63: 176-186.
- [2] Fan Wang, Liang Zhao, Xiaodong Wu, Fanning Dang. Measurement and Analysis of Concrete Deformation Field Based on CT and Digital Image Correlation Method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 200401.  
王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 200401.
- [3] Wu R, Liu Y, Zhou J M, et al. Full-field strain measurement of rotating object using digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312005.  
吴荣, 刘依, 周建民, 等. 数字图像相关在旋转物体全场应变测量中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312005.
- [4] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9): 1719-1733.
- [5] Zhu F P, Gong Y, Bai P X, et al. Determination of tensile stress-strain curve of brittle materials based on two-dimensional digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3): 333-342.  
朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于二维 DIC 的脆性材料拉伸应力-应变曲线测定[J]. *实验力学*, 2018, 33(3): 333-342.
- [6] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 28-37.
- [7] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses: implementation of a generalized compensation method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(2): 025001.
- [8] Lü Z, Xu X H, Yan T H, et al. High-accuracy optical extensometer based on coordinate transform in two-dimensional digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 61-70.
- [9] Zhu F P, Bai P X, Shi H J, et al. Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(6): 065007.
- [10] Zhu F P, Gong Y, Bai P X, et al. Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1061-1069.  
朱飞鹏, 龚琰, 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.
- [11] Zhu F P, Lu R Z, Bai P X, et al. Enhancement of strain measurement accuracy of two-dimensional digital image correlation based on dual-reflector imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212002.  
朱飞鹏, 陆润之, 白鹏翔, 等. 双反射镜成像用于二维数字图像相关应变精度提升[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212002.
- [12] Dong B, Tian L, Pan B. Tensile testing of carbon fiber multifilament using an advanced video extensometer assisted by dual-reflector imaging[J]. *Measurement*, 2019, 138: 325-331.
- [13] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy twodimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.  
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): 0412004.
- [14] Shao X X, Eisa M M, Chen Z N, 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.
- [15] Zhu F P, Lu R Z, Gu J, et al. High-resolution and high-accuracy optical extensometer based on a reflective imaging technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 106136.
- [16] Chen B, Chen W P, Pan B. High-precision video extensometer based on a simple dual field-of-view telecentric imaging system[J]. *Measurement*, 2020, 166: 108209.