

文章编号: 1001-4888(2024)03-0295-10

基于普通镜头与改进视场分离技术的光学引伸计*

郑人逢¹, 朱飞鹏², 白鹏翔², 雷冬²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 力学与工程科学学院, 江苏南京 211100)

摘要: 虽然基于远心镜头的光学引伸计在应变测量中具有精度高的优点, 但是远心镜头成本高、视场固定的不足使得引伸计灵活性较差, 因此, 本文提出了一种基于低成本普通镜头与改进视场分离技术的光学引伸计方法。该方法取 2 个独立视场中心线上的点作为标距点, 既减小了离面刚体位移对测量方向应变的影响, 又有效增加了引伸计标距。通过不锈钢试样的静态实验和单轴拉伸实验验证了该光学引伸计的可行性和稳定性, 实验结果的均方根误差 (RMSE) 约为 $5\mu\epsilon$, 表明提出的光学引伸计具有很高的应变测量精度。

关键词: 光学引伸计; 视场分离; 数字图像相关; 应变测量精度; 离面位移

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-026

0 引言

利用实验对材料的应力-应变关系进行测量具有十分重要的意义。在应变测量中, 最常见的方式是使用接触式(如卡扣)引伸计。国内外知名试验机厂商都有与各自试验机相配套的接触式引伸计产品对外销售。虽然接触式引伸计具有测试精度高、量程较大(20%以内)的优点, 但是也存在夹持过程容易造成试件(尤其柔性材料)表面损伤、试件破坏时会造成引伸计损坏等不足。随着技术的发展与进步, 非接触式光学引伸计(即视频引伸计)应运而生, 目前已在许多科研与工程技术领域得到了较广泛的应用。

非接触式光学引伸计测量原理与接触式引伸计类似, 通过测量 2 个标记点的相对位移, 再除以两点之间的初始标距, 最终得到应变测量值。基于二维数字图像相关(DIC), BAI 等^[1]和 PAN 等^[2-3]提出了将普通镜头与外补偿方法相结合的引伸计方法, 减小了离面位移对普通镜头成像的影响。为避免外补偿薄片的使用, ZHU 等^[4-5]提出了基于双 45°反射镜成像的光学引伸计方法, 通过取试样正反面对应点的位移均值, 来自行抵消掉离面位移的影响。SUTTON 等^[6]的研究表明, 远心镜头可有效减小离面运动对应变测量的影响。PAN 等^[7]发展了基于双侧远心镜头和主动成像的光学引伸计方法, 其最大轴向和横向应变小于 $30\mu\epsilon$ 。由于引伸计标距受到相机分辨率的限制, PAN 等^[8-9]、ZHU 等^[10-12]和薛永江等^[13]提出了各自的视场分离技术, 利用设计的光学装置和单个相机记录下试样表面相隔较远 2 个区域的图案, 将标距增大至相机分辨率的 3~5 倍, 有效提高了引伸计的测量分辨率和精度。此外, SHAO 等^[14-15]提出了基于单相机和三维 DIC 的光学引伸计方法, 利用该方法可有效提高应变测量精度。鉴于远心镜头的成本较高, 朱飞鹏等^[16]提出基于双平行相机的光学引伸计方法, 利用每个相机视场中心几乎不受离面位移影响的特性, 选择视场中心作为引伸计标距点, 同时将标距增大到相机分辨率 3 倍以上。然而, 双相机的使用仍然不够便捷、成本也高, 因此, 本文提出一种基于单相机和普通成像镜头的光学引伸计方法, 既降低了成本, 又具有较高的应变测量精度。

* 收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(12172120)

通信作者: 朱飞鹏(1983-), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 光测实验力学。Email: zhufeipeng@hhu.edu.cn

1 测量原理

1.1 基于普通镜头与改进视场分离的光学引伸计

如图 1(a)所示,当试样发生一个靠近镜头的离面刚体平移 ΔZ 时,根据针孔相机模型,试样上一点将会在相机像面产生一个虚假位移 v 。以图像中心 O 为圆心的一个圆上各点的位移矢量大小相等,方向沿着径向向外,如图 1(b)所示。理想情况下,离面刚体平移不会引起图像中心点 O 的虚假位移,但图像中心具有唯一性,无法使用如图 2(a)所示的视场分离技术^[11]达到增大标距的目的。注意到在图 1(b)中,位于 x 轴上的点如 A 、 B 的虚假位移只沿水平方向,而无竖向分量,因此,提出如图 2(b)所示的改进视场分离技术,将 2 个相同的斜方棱镜左右错位布置,每个棱镜可以将光线平行移动一个距离。利用该布置可以将试样表面相距较远的 2 个独立区域汇聚在一起,从而实现分离视场的汇聚和图像记录。

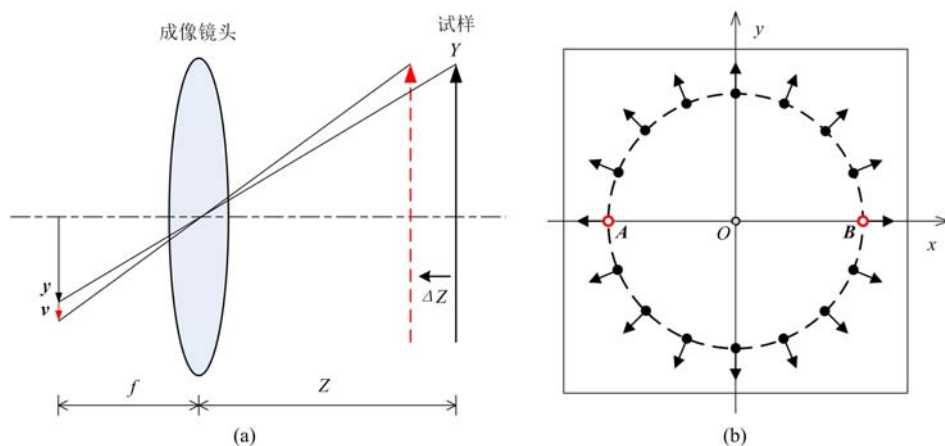


图 1 离面运动对普通镜头的影响:(a)靠近镜头的离面平移;(b)面内虚假位移矢量

Fig. 1 The effect of out-of-plane motion on common lens:

(a) out-of-plane translation toward the lens; (b) the in-plane fake displacement field

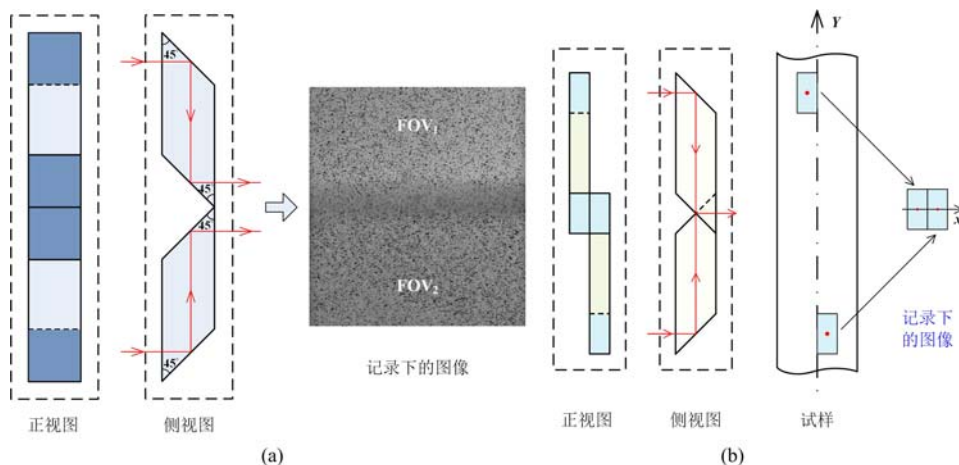


图 2 2 种视场分离技术:(a)传统的视场分离技术;(b)改进的视场分离技术

Fig. 2 Two FOV-splitting techniques: (a) the conventional FOV-splitting technique;

(b) the proposed modified FOV-splitting technique

图 3 为基于普通镜头与改进视场分离的光学引伸计测量示意图。由于图 2(b)中,用相机记录得到的试样 2 个区域的连线并未平行于 y 轴,因此,在测量时需将双斜方棱镜作为一个整体沿顺时针旋转一个小角度,以实现试样沿 y 轴方向的应变测量。通过该布置,相机得到的图像左半部分为上视场 FOV_1 ,右半部分为下视场 FOV_2 ,在两者交界处有一段模糊区域,如图 3(b)所示。为便于选取引伸计标距点,在试样表面画一条沿待测方向的定位线。在图 3(b)中,选取图像水平中线上的点 A 、 B (定位线右

侧)为标距点。由 A、B 标距点位移和两者之间的距离,计算得到试样的竖向应变 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{V_A - V_B}{L_0} \quad (1)$$

式中: V_A 、 V_B 为标距点 A、B 的竖向位移 (mm); L_0 为标距长度 (mm)。

由于上述基于普通镜头光学引伸计的标距点选在图像水平中线上,受离面位移影响很小,同时双斜方棱镜的布置有效增大了引伸计标距,因此,即使不采用位移补偿,也可以有效提高应变测量精度。

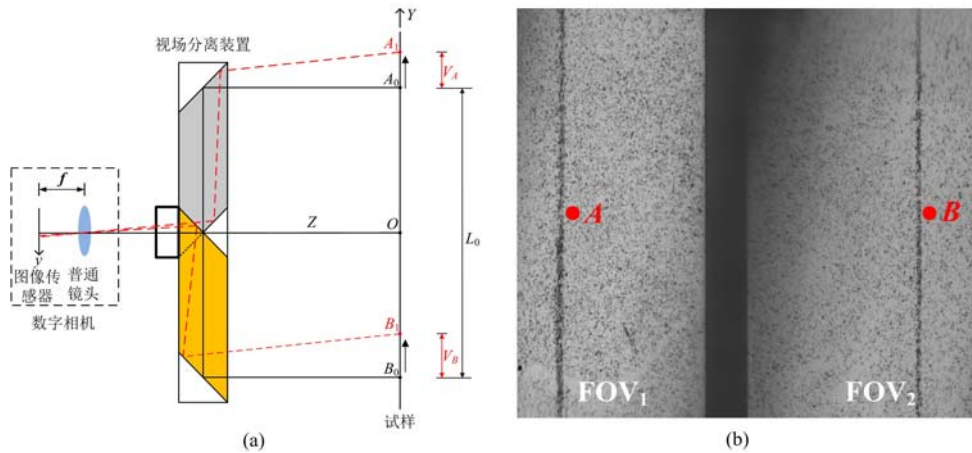


图 3 文中提出的光学引伸计测量示意图: (a) 光学布置; (b) 记录下的图像

Fig. 3 The measurement schematic diagram of proposed optical extensometer:

(a) optical arrangement; (b) a recorded image

1.2 标定原理

为了确定式(1)中的标距 L_0 , 选用一把刻度尺与试样放于同一平面内, 得到标定图如图 4 所示。在左视场 FOV_1 中, 选取 2 个已知刻度点 C、D, 由刻度值 Y_C 、 Y_D 与图像坐标 y_C 、 y_D (pixel) 得到真实长度 L_{CD} (mm) 和图像长度 l_{CD} (pixel); 在右视场 FOV_2 中, 选取 2 个已知刻度点 E、F, 得到真实长度 L_{EF} 和图像长度 l_{EF} 。根据式(2), 分别得到左视场和右视场的放大倍数 k_1 和 k_2 (以 pixel/mm 为单位):

$$k_1 = \frac{l_{CD}}{L_{CD}}, k_2 = \frac{l_{EF}}{L_{EF}} \quad (2)$$

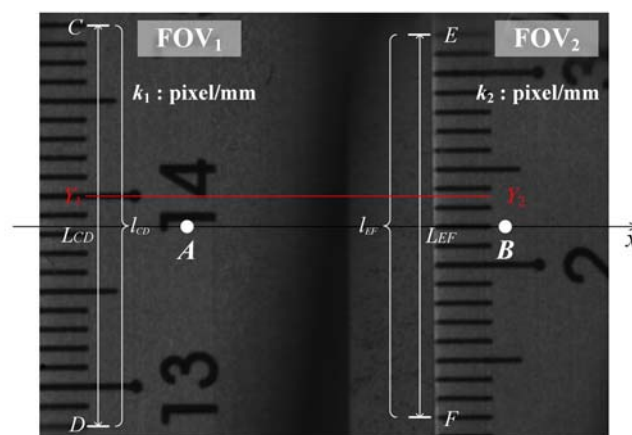


图 4 标距标定示意图

Fig. 4 The schematic diagram of gauge-length calibration

由于标距点 A、B 选在图像水平中线处, 其图像坐标 (单位 pixel) 已知, 而真实刻度未知, 因此, 根据点 C、D 与点 E、F 的真实刻度和图像纵坐标, 利用式(3)的线性插值得到 A、B 点的刻度值 Y_A 、 Y_B :

$$\begin{aligned} Y_A &= Y_C + (y_A - y_C)/k_1 \\ Y_B &= Y_E + (y_B - y_E)/k_2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: Y_C, Y_E 为标定图像上点 C、E 的刻度值(mm); y_C, y_E 为点 C、E 的纵坐标(pixel); $y_A = y_B = h/2$ 为图像高度的一半。

由式(3)可得,该光学引伸计的标距即 A、B 标距点之间的距离为

$$L_0 = Y_A - Y_B \quad (4)$$

在上述引伸计中,根据二维 DIC 算法得到的标距点位移 v_A, v_B 通常以 pixel 表示,将 $V_A = v_A/k_1$ 和 $V_B = v_B/k_2$ 代入式(1),可以得到

$$\epsilon = \frac{(v_A/k_1) - (v_B/k_2)}{L_0} = \frac{v_A - v_B \cdot k}{l_0} \quad (5)$$

式中: $k = k_1/k_2$ 为标距点 B 的矫正系数; v_A, v_B 为标距点 A、B 的竖向位移(pixel); $l_0 = k_1 L_0$ 为图像标距(pixel),即点 A、B 之间的像素距离。

1.3 离面转动影响分析

由于离面刚体转动的情况比离面平移复杂,因此,需要分析离面转动对上述光学引伸计的影响。如图 5 所示,选取相机左、右视场标距点 A_0 和 B_0 ,当试样绕着底部 C 点,以 θ 转角发生离面转动时,点 A_0 和 B_0 分别移动到 A_1 和 B_1 ,此时相机中观察到的标距点即为试样表面的 A_2 和 B_2 ,对应位移分别为 V_A 和 V_B , $V_A = \overline{A_0 A_2}$, $V_B = \overline{B_0 B_2}$ 。为便于分析,过 A_1 作光轴的垂线,相交于 A_3 ;过 B_1 作光轴的垂线,相交于 B_3 。Z 为视场分离装置到试样表面的距离,相机焦距为 f , Z' 为镜头到试样表面标距点的成像距离($Z' > Z$),根据相似三角形关系,可以得到离面转动引起的应变测量误差如下:

$$\epsilon_{\text{err}}^{\text{prop}} = \frac{V_A - V_B}{L_0} \approx (\cos\theta - 1) \left(1 - \frac{2L_C + L_0}{Z'}\right) \approx -\frac{\theta^2}{2} + \frac{L_C + \frac{L_0}{2}}{Z'} \theta^3 \quad (6)$$

式中:变量 L_0 为两标距点之间的实际距离; L_C 为转动中心 C 到较近标距点的距离。

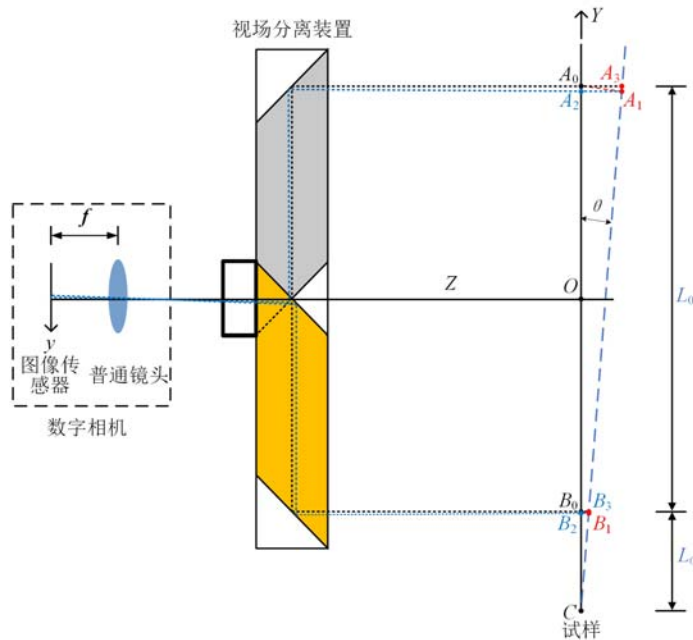


图 5 离面转动对文中引伸计的影响示意图

Fig. 5 The influence schematic diagram of out-of-plane rotation on the proposed extensometer

由于 θ 为小量,因此式(6)中 θ 的三次项是高阶无穷小量,式(6)可以简化为

$$\epsilon_{\text{err}}^{\text{prop}} \approx -\frac{\theta^2}{2} \quad (7)$$

而常规光学引伸计由离面转动引起的应变误差可近似表示为转角 θ 的一次项形式^[6],即

$$\epsilon_{\text{err}}^{\text{conv}} \approx -\frac{L_C}{Z} \theta \quad (8)$$

式中: Z 为试样表面到镜头中心的距离; L 为转动中心到相机视场中心的距离。

对比式(7)和式(8)可知, 本文所提出的光学引伸计应变误差为转角 θ 的二次函数, 而常规引伸计的应变误差则为 θ 的一次函数形式。在一般拉伸和压缩实验中, 试验机上下夹头不同轴所引起的离面转角比较小(现在试验机同轴度比较好, 这个角度小于 1°)。当 $\theta=1^\circ$ 时, 两者误差分别为 $-152\mu\epsilon$ 和 $-3879\mu\epsilon$ ($L/Z=90/405$), 充分说明本文光学引伸计远优于常规光学引伸计。

2 离面刚体平移实验

为了验证本文光学引伸计方法的可行性, 开展离面刚体平移实验。

2.1 实验装置与实验过程

为实现如图 2(b)所示的视场分离技术, 加工设计了如图 6(a)~(c)所示的装置实物图, 装置外壳尺寸为 $132\text{mm}\times 40\text{mm}\times 14\text{mm}$, 上、下两侧的透光区域为 $10\text{mm}\times 5\text{mm}$, 单个斜方棱镜的两面反射镜相距 60mm , 两棱镜反射镜尺寸均为 $8\text{mm}\times 5\text{mm}$ 。如图 6(c)所示, 装置内有 2 个深 8mm 、宽 5mm 的凹槽, 将 2 个斜方棱镜放置在壳体对应的凹槽内后, 再通过侧面的螺丝将其固定在凹槽内。通过图 6(a)中的后端螺纹将视场分离装置安装在镜头前端。如图 6(d)所示, 将一个长 300mm 、高 36mm 、宽 12mm 的刚性平面试样放置在手动平移台上, 试样表面喷涂均匀的黑白散斑。实验采用的相机由分辨率 $2588\text{pixel}\times 1940\text{pixel}$ (每 pixel 尺寸为 $2.2\mu\text{m}\times 2.2\mu\text{m}$) 的 AVT GPF-503B 图像传感器和一个 75mm 的 Computar 定焦镜头组成。

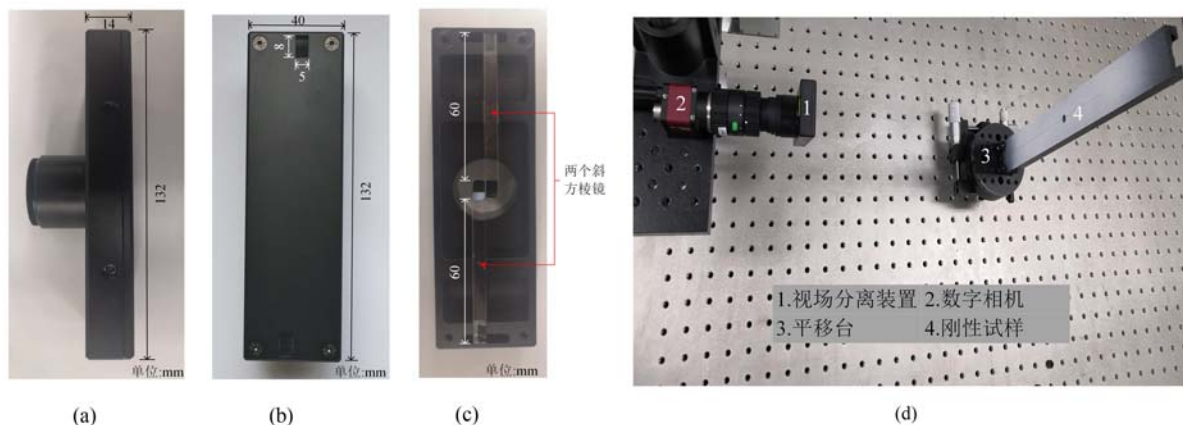


图 6 离面平移实验装置: (a) 视场分离装置的侧视图; (b) 正视图; (c) 内部图; (d) 实验照片

Fig. 6 Experimental setup for out-of-plane translation test: (a) side view; (b) front view; (c) inner view of FOV-splitting device; (d) experiment photograph

如图 6(d)所示, 将相机正对试样表面后, 微调相机直至观察到试样表面散斑, 然后顺时针旋转视场分离装置, 当图像上出现两条清晰的竖向直线时停止旋转, 最后用尺子测量出试件表面到相机上、下端之间的距离, 确保两段距离相同。

实验开始前, 在试样表面贴放标尺, 采用 1.2 节中所述方法标定标距。控制相机采集第 1 幅散斑图像作为参考图像, 然后手动调节图 6(d)中平移台使其向右移动, 从而带动试样远离相机。平移台每次移动量为 0.1mm , 最终移动量为 1.0mm 。在每次移动结束时, 记录一幅图像作为目标图像。采用二维 DIC 算法进行位移计算, 计算子区为 $71\text{pixel}\times 71\text{pixel}$, 步长为 5pixel 。引伸计标距 $l_0=10045\text{pixel}$, $k=1.001526$ (为方便计算, 取 1)。

2.2 实验结果分析

计算得到左、右视场中标距点的竖直位移 v , 如图 7(a)所示。从图中可知, 图像中心位移不为零(主要因为试样与相机光轴之间不严格垂直), 都呈现斜直线上升趋势且上升幅度基本一致, 尤其当离面平移量较小时, 两者位移基本一致。刚性离面平移时的真实应变为零, 因此将图 7(a)中的竖直位移代入式(1)得到光学引伸计的实测应变误差, 如图 7(b)所示。由图 7(b)可知, 当离面位移小于 0.9mm 时, 本

文光学引伸计应变误差均小于 $10\mu\epsilon$ (数值对应左侧纵轴)。此外,在图 3(b)左视场选取了一组常规光学引伸计(标距 1500pixel)作为对比,其测量结果也如图 7(b)所示(数值对应右侧纵轴)。由图 7(b)可知,常规光学引伸计的应变误差随所施加的离面位移呈线性变化,且测量误差大幅度上升,最大值约为 $2500\mu\epsilon$,主要原因是离面位移改变了图像的放大倍率,进而引起均匀的应变误差 $\Delta Z/Z^{[6]}$ 。离面刚体平移实验表明本文所提出的光学引伸计能有效抵抗离面运动的影响,在高精度应变测量方面具有很高的可行性。

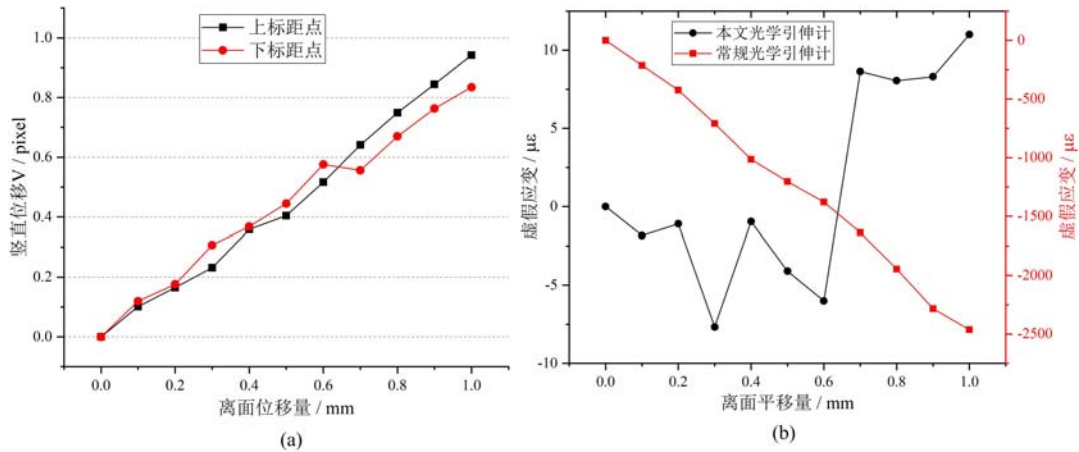


图 7 离面位移实验的测量结果:(a) 2 个标距点的竖直位移;(b) 应变误差

Fig. 7 Measurement results in out-of-plane displacements:

(a) vertical displacements of two gauge points; (b) strain errors

3 不锈钢拉伸应变测量精度实验

单轴拉伸实验采用如图 8(a)所示的不锈钢拉伸试样,其平行长度为 180mm,矩形截面宽度为 20mm,厚度为 1mm。为得到光学引伸计的精度情况,在试样表面中心区域粘贴了 2 枚应变片。如图 8(b)所示,将试样安装在 INSTRON 3367 万能试验机上,通过夹头固定其上、下端。使用的相机与离面位移实验中相同,实验开始前,先将镜头光圈调至最大,达到最小景深;观察图像,当左、右视场不清晰时,调整三脚架和相机;若同时清晰成像,则表明相机光轴与试样表面近似垂直,此时可微调光圈至恰当位置,最后再顺时针旋转视场分离装置,使得图 3(b)所示竖向定位线同时位于相机视场中。整个实验过程中,试样与视场分离装置之间的距离始终保持不变,约为 275mm。

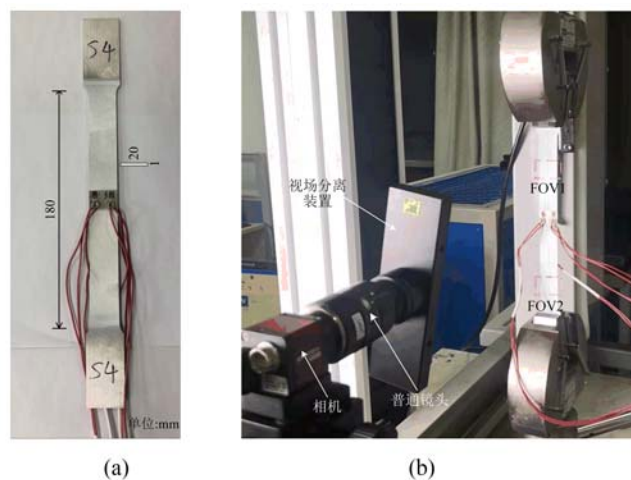


图 8 实验器材:(a) 不锈钢拉伸试样;(b) 实验设备

Fig. 8 Experimental apparatus: (a) stainless steel tensile specimen; (b) experimental setup

在应变测量过程中,外界环境不可避免会引起测量误差,因此,首先进行静态实验,以评估环境因素对文中光学引伸计的影响,然后开展不锈钢拉伸实验,评估其应变测量精度。

3.1 静态实验

本文实验中,所施加的拉伸荷载恒定为 0.3kN,试样一直保持稳定状态。总共进行了 3 次静态实验。在第 1 次实验中,相机的帧率设置为每秒 1 帧,记录时间为 30s;第 2 和第 3 次实验中相机帧率都设置为每秒 2 帧,记录时间分别为 30s 和 50s。

光学引伸计的标距为 9789pixel,因荷载恒定,故计算所得应变即为测量误差,相应的应变结果如图 9(a)所示。从图中可以发现 3 次静态实验中的大部分应变误差在 $[-6\mu\epsilon, 5\mu\epsilon]$ 内波动,而有个别应变误差较大,达到 $10\mu\epsilon$ 以上,可能是由于周边环境震动造成的。通过对图 9(a)中的结果进行分析,得到如图 9(b)中的 3 次静态实验的均方根误差(RMSE)。第 1 次实验的均方根误差最大,为 $3.8\mu\epsilon$,3 次实验的均方根误差均值为 $2.95\mu\epsilon$ 。

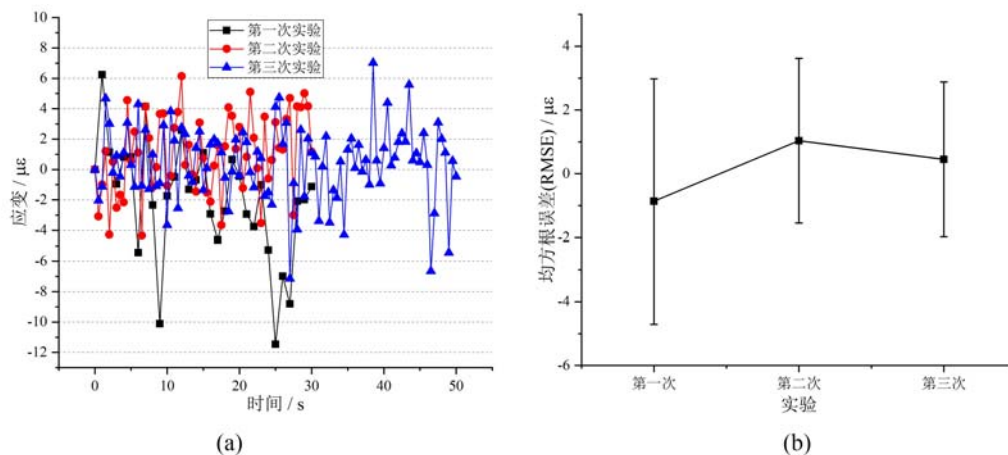


图9 静态实验中光学引伸计的应变结果:(a)3次重复实验的应变误差;(b)3次实验中的应变均方根误差

Fig. 9 Strain results of the proposed optical extensometer in static tests:

(a) strain errors in three repeated tests; (b) strain RMSE in the three tests

由于本文所选 CMOS 相机成本较低,噪声稍大,因此 DIC 计算位移精度略低,约为 0.02pixel。根据式(1)可得该光学引伸计的标准应变误差约为 $(0.02+0.02)/9820=4.09\mu\epsilon$,与实验结果基本相符。

3.2 单轴拉伸实验

单轴拉伸实验时,首先,对试件施加 0.3kN 的初始拉伸荷载,同时记录一幅图像作为参考图像,并将应变仪读数置零。然后采用逐级分步加载的方式,每级加载步长为 0.3kN,对应的应变增量约为 $75\mu\epsilon$ 。在每个加载状态下,采集一幅图像作为目标图像,并记录应变片读数。为保证试样在线弹性范围内能重复加载,将最大荷载设置为 4.2kN。

光学引伸计标距仍为 9789pixel,另选取一种标距为 1600pixel 的常规光学引伸计进行对比,理论上应变误差可下降至 $1600/9789\approx 1/6$ 。将两类光学引伸计进行对比,得到如图 10 所示的应变结果。图 10(a)为在第 1 次拉伸实验中使用常规光学引伸计、本文光学引伸计以及应变仪测得的轴向应变。从图中可知,光学引伸计的测量结果与应变仪的测量结果吻合程度非常高,而常规光学引伸计的测量结果存在着显著的应变误差。因此,为能够清晰观察误差大小,图 10(b)中显示了这 2 种不同引伸计相对于应变仪结果的应变误差。图中结果表明,文中光学引伸计的应变误差较小,均小于 $11\mu\epsilon$;而常规光学引伸计的应变误差呈现复杂的趋势,前一部分误差随荷载的增加而逐渐增大,最大误差约为 $340\mu\epsilon$;后一部分误差随荷载的增加而上下浮动,当荷载达到 3.3kN 时,应变误差达到最大值 $365\mu\epsilon$,原因是在拉伸过程中试样产生了不可避免的离面位移(试验机上下夹头不严格同轴所致),随着荷载增大,离面位移逐渐稳定,应变误差也趋于稳定。从图 10 应变结果可知,基于普通镜头的常规光学引伸计得到的应变误差很大(高达 $365\mu\epsilon$),而本文所提出的光学引伸计在不需要任何补偿以及远心镜头下,最大应变误差仅为 $10.85\mu\epsilon$,具有较高精度的应变测量结果。

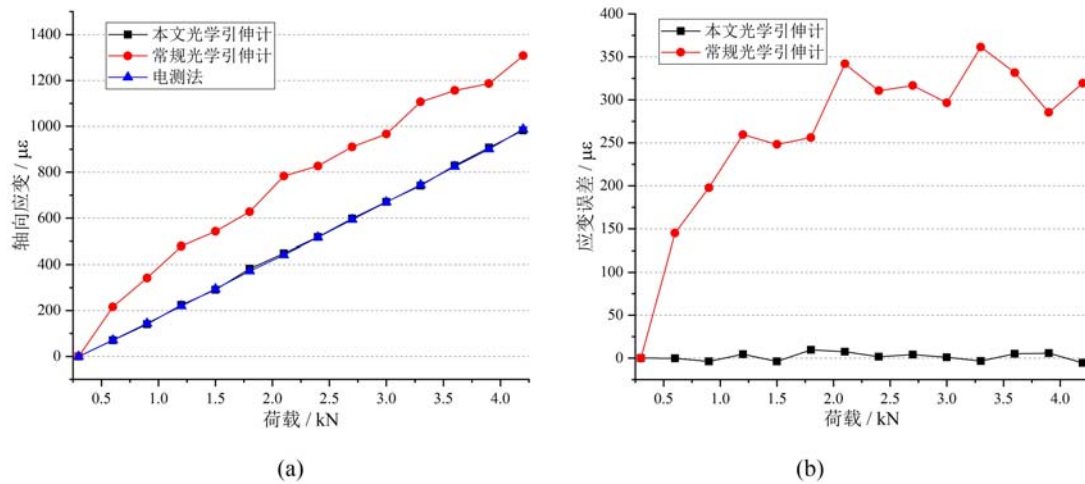


图 10 第 1 次拉伸实验测量结果:(a) 文中光学引伸计、常规光学引伸计和应变仪获得的应变;
(b) 两类光学引伸计与应变仪之间的应变误差

Fig. 10 Measurement results in the first tensile test: (a) strain obtained using the proposed optical extensometer, conventional optical extensometer and strain gauge; (b) strain differences between two optical extensometers and strain gauge

图 11 所示为前 2 次单轴拉伸实验中,本文光学引伸计和应变仪测得的轴向应变-荷载曲线(数值对应左侧纵轴)以及两者间的应变差值(数值对应右侧纵轴)。从图中可见,2 次实验中本文光学引伸计的测量结果与应变仪所得结果基本一致,并且应变误差均小于 $11\mu\epsilon$,在大多数情况下,应变误差都小于 $6\mu\epsilon$,而个别误差较大,可能是受到环境震动的影响所致。

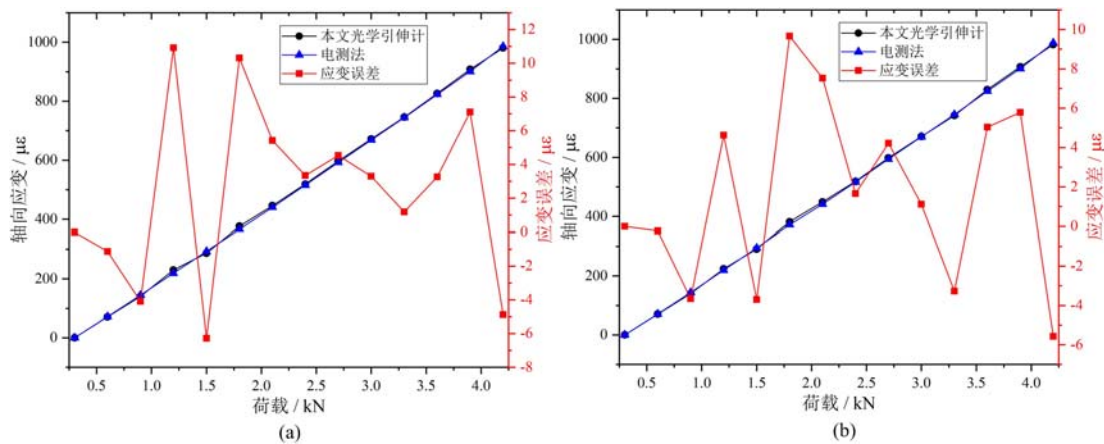


图 11 前 2 次拉伸实验中光学引伸计获得的应变结果:(a) 第 1 次;(b) 第 2 次

Fig. 11 Strain results obtained using the proposed optical extensometer:(a) the first;
(b) the second tensile test

4 次重复拉伸实验的应变误差统计见表 1,4 次实验中平均应变误差均不超过 $5\mu\epsilon$,最大均方根误差为 $5.24\mu\epsilon$,表明本文光学引伸计存在较小的测量误差。根据式(1),可得应变测量的标准差约为 $2 \times 0.02/9789 = 4.09\mu\epsilon$,与表中对应的标准差基本一致。总体而言,单轴拉伸实验结果验证了本文光学引伸计的可行性和稳定性,具有较高的应变测量精度。

表1 4次重复拉伸实验中应变误差统计值
Tab.1 Strain-error statistics in four repeated tensile tests

	1	2	3	4
最大值/ $\mu\epsilon$	10.92	9.66	10.64	10.21
均值/ $\mu\epsilon$	2.36	1.66	4.31	3.23
标准差/ $\mu\epsilon$	5.29	4.66	5.27	5.44
均方根误差(RMSE)/ $\mu\epsilon$	5.09	4.49	5.08	5.24

4 结论

针对远心镜头成本较高和双平行相机实验装置复杂的问题,本文提出了一种基于普通镜头和改进视场分离技术的光学引伸计方法。在该光学引伸计中,选择左、右视场的图像高度中心处作为标距点,将标距大小由1600pixel增至9789pixel,应变误差可下降到 $1600/9789 \approx 1/6$ 。首先,理论分析表明该引伸计受离面刚体转动影响远小于常规光学引伸计;然后,通过离面刚体平移实验和静态实验验证了该光学引伸计几乎不受离面平移的影响且有较强的抗环境干扰能力;最后,进行了不锈钢试样的4次重复单轴拉伸实验,验证了该光学引伸计具有准确性和稳定性。实验结果显示,本文光学引伸计的应变平均误差均小于 $5\mu\epsilon$,均方根误差(RMSE)稳定在 $5\mu\epsilon$ 左右,因此,表明本文提出的基于普通镜头和改进视场分离技术的光学引伸计具有较高的应变精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] TIAN L, YU L P, PAN B. Accuracy enhancement of a video extensometer by real-time error compensation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110:272-278.
- [4] 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.
- [5] 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 (ZHU Feipeng, GONG Yan, BAI Pengxiang, 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 (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] PAN B, TIAN L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(17):19082-19093.
- [8] DONG B, LI C Z, PAN B. Ultrasensitive video extensometer using single-camera dual field-of-view telecentric imaging system[J]. Optics Letters, 2019, 44(18):4499-4502.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 朱飞鹏, 顾剑, 陆润之, 等. 视场分离式光学引伸计的改进与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23):121-126 (ZHU Feipeng, GU Jian, LU Runzhi, et al. Improvement and realization of field-of-view splitting optical extensometer[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(23):121-126 (in Chinese))

- [12] ZHU F P, TAO J, LU R Z, et al. Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques[J]. *Measurement*, 2021, 174:109024.
- [13] 薛永江, 胡静, 李凯. 基于视场分割的双远心镜头高精度视频引伸计[J]. *实验力学*, 2022, 37(2):175–182 (XUE Yongjiang, HU Jing, LI Kai. A high precision video extensometer based on division of field of view[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(2):175–182 (in Chinese))
- [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] 吴旷达, 屈敬业, 邵新星, 等. 基于单相机四视角成像的双轴三维视频引伸计[J]. *光学学报*, 2022, 42(13):107–113 (WU Kuangda, QU Jingye, SHAO Xinxing, et al. Biaxial three-dimensional video extensometer based on single-camera four-view imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13):107–113 (in Chinese))
- [16] 朱飞鹏, 陶金, 顾剑, 等. 基于双平行相机的高精度光学引伸计及标距矫正[J]. *实验力学*, 2022, 37(2):191–198 (ZHU Feipeng, TAO Jin, GU Jian, et al. High accuracy optical extensometer and gauge length correction based on two parallel cameras[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(2):191–198 (in Chinese))

Optical extensometer based on the common lens and modified field-of-view splitting technique

ZHENG Renfeng¹, ZHU Feipeng², BAI Pengxiang², LEI Dong²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: Although optical extensometers based on telecentric lens have the advantages of high strain measurement accuracy, the shortcomings of high cost and fixed field of view (FOV) of telecentric lenses make the extensometer less flexible. Therefore, an optical extensometer based on a low-cost common lens and improved FOV-splitting technique was proposed. This method took the points on the centerline of two independent fields of view as the gauge points, which not only reduced the influence of the rigid-body displacement on the strain of the measurement direction, but also effectively increased the gauge length of the extensometer. Static experiments and uniaxial tensile experiments of a stainless-steel specimen were carried out to verify the feasibility and measurement accuracy of the optical extensometer, and the root mean square error (RMSE) of the experimental results was approximately $5\mu\epsilon$, indicating that the improved optical extensometer has high strain measurement accuracy.

Keywords: optical extensometer; field-of-view splitting; digital image correlation; strain measurement accuracy; out-of-plane displacement