

## 激光与光电子学进展

## 基于数字图像相关的柔性屏弯折应变测量分析(特邀)

李骏睿<sup>1</sup>, 王欢庆<sup>1,2</sup>, 潘万林<sup>1</sup>, 余卿<sup>3</sup>, 王永红<sup>1\*</sup><sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;<sup>2</sup>中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 柔性屏在弯折的过程中, 容易出现器件损伤、胶层剥离等现象, 因此明确屏幕在弯折过程中屏幕保护层的应变分布十分重要。提出一种基于数字图像相关(DIC)的柔性屏弯折应变测量方法, 通过采集屏幕表面保护层的喷涂散斑图像来实现屏幕弯折过程保护层应变的全场测量, 然后根据匹配点坐标计算弯折平面方程, 得出弯折角度与应变之间的关系。实验结果表明, 所提方法能测量出不同弯折角度下屏幕保护层全场应变信息, 进而得知屏幕保护层的应力分布情况。即所提方法可量化屏体弯折时的应变量并根据应变测量结果推断出弯折过程中应力分布情况。

**关键词** 柔性屏弯折; 应变分布; 数字图像相关; 全场测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232204

## Analysis of Flexible Screen Bending Strain Measurement Based on Digital Image Correlation (Invited)

Li Junrui<sup>1</sup>, Wang Huanqing<sup>1,2</sup>, Pan Wanlin<sup>1</sup>, Yu Qing<sup>3</sup>, Wang Yonghong<sup>1\*</sup><sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;<sup>2</sup>PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, Anhui, China;<sup>3</sup>School of Electromechanical and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

**Abstract** Bending of flexible screens often leads to issues such as device damage and adhesive layer delamination. Therefore, it is essential to understand the strain distribution in the protective layer during the bending process. This study presents a method for measuring the strain in a flexible screen during bending, utilizing digital image correlation. The method enables synchronized full-field strain measurements in the protective layer while simultaneously capturing speckle pattern images applied to the screen surface. Subsequently, we calculate the bending plane equation based on matching point coordinates, revealing the relationship between bending angle and strain. Experimental results validate the effectiveness of this approach in providing comprehensive strain data for the protective layer at various bending angles. Consequently, this method quantifies the strain occurring on the screen and provides insights into stress distribution during the bending process.

**Key words** bending of flexible screen; strain distribution; digital image correlation; full-field measurement

## 1 引言

随着人们对显示设备功能性要求的不断提高, 以及柔性屏技术的不断革新, 当前市场对于柔性显示设备的需求也越加强烈<sup>[1-2]</sup>。相较于传统屏幕, 柔性 OLED 屏优势明显, 不仅体积更加轻薄, 而且功耗低于原有器件, 有助于提升设备的续航能力, 同时其可弯

曲、柔韧性佳的特性也使耐用程度大大高于传统的屏幕<sup>[3-8]</sup>。然而, 柔性屏虽然可以弯曲, 但如果频繁弯曲, 就会出现疲劳损害问题。并且更为严重的是, 由于柔性屏由多个膜层组成, 当屏幕变形较大时, 可能会使屏幕不同膜层间出现剥离造成永久性伤害, 降低使用寿命。

针对柔性屏弯折损伤问题, 国内外学者进行了一

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-10-27; 录用日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52205562, 52375536)、江西省重点研发计划项目(20223BBE51010)

通信作者: \*lijunrui@hfut.edu.cn

系列研究。2016年, Niu等<sup>[9]</sup>采用公式推导的方式研究了 OLED 薄膜结构的弯折性能, 从理论上得到了柔性屏各结构层级之间的应变分布。2018年, 刘正周等<sup>[10]</sup>通过建立 OLED 柔性屏的弯折仿真模型, 分析了不同堆叠结构、保护盖板刚度、背板厚度和弯折半径对弯折后显示层、应力中性层位置应变的影响。2021年, 郑宏兵等<sup>[11]</sup>通过有限元方法分析了覆晶薄膜连接过渡区相关结构的偏移、胶层厚度在弯折过程和可靠性因素下对金属层应力的影响, 同时研究了弯折路径改变后金属层应力的变化情况。Lin等<sup>[12]</sup>讨论了对 OLED 面板不同区域的温度预测, 根据 4 个温度传感器和显示的图片来预测 OLED 面板的温度分布, 再根据温度变化对 OLED 屏的老化情况进行评估。同年, Wu等<sup>[13]</sup>通过 AMOLED 面板结构优化的基本理论, 针对面板折叠后对称轴上的力平衡问题, 用力学理论解释了可折叠面板结构优化的方向, 并分别说明了薄膜的模量和厚度的调整方法。2022年, Niu等<sup>[14]</sup>对柔性 OLED 屏的弯曲模型进行了有限元分析, 对普通 U 形弯曲建立仿真模型, 研究了弯曲半径与施加应力的关系。另外, 有研究指出当柔性屏受到多次压缩和拉伸应力时, 众多膜层结构中屏幕显示层的光学器件是最容易损坏的<sup>[15]</sup>。因此, 对于弯折过程中柔性屏不同结构膜层尤其是显示层的应变测量具有重要意义。综上所述, 当前对于柔性屏弯折应变测量研究多处于理论推断或者是仿真模拟阶段<sup>[16]</sup>, 而模拟实验多为理想状态, 因此仅靠仿真模拟对于器件应变测量的实际参考价值有限, 当前亟须一种无损全场测量方法来对弯折过程中 OLED 屏不同膜层上的应变进行实际量化测量。

本文提出一种新的柔性屏屏幕保护层弯折应变测

量方法, 该方法基于 DIC 技术通过采集屏幕弯折过程中屏幕保护层的喷涂散斑图像进行图像匹配获取不同弯折角度的散斑图像, 以此来实现屏幕弯折过程屏幕保护层应变的全场测量, 再通过平面拟合方程来同时测量弯折角度, 讨论弯折角度与应变大小之间的关系。测量结果可为柔性 OLED 的屏幕结构设计、使用寿命, 以及弯折过程中出现的力学问题提供参考。

## 2 测量原理

### 2.1 DIC 原理

DIC 技术<sup>[17-20]</sup>是在 20 世纪 80 年代提出并发展起来的, 其基本原理是通过相机采集覆盖有散斑的被测试件变形过程中的散斑图像序列, 并对采集的图像序列进行正确的灰度信息相关匹配计算。由于喷涂或模拟散斑随机生成, 因此某块子区域内的散斑往往具有唯一性, 使得图像序列之间可以正确进行灰度匹配。

DIC 原理如图 1 所示, 散斑图案匹配的过程就是在变形图像上找到与参考图像上的点  $P(x_0, y_0)$  和  $Q(x_1, y_1)$  相关系数最大的点  $P'(x_0', y_0')$  和  $Q'(x_1', y_1')$ , 因为计算时单点匹配可能会出现误匹配的现象, 因此一般在参考图像上选取大小为  $(2m+1) \times (2m+1)$  的正方形子区域作为计算子区, 对每一张变形图像采用匹配函数搜索出与参考图像上各点相关系数最大的位置进行匹配。选取抗干扰性较强、性能稳定的零均值归一化互相关函数  $C_{ZNCC}$  [式(1)] 来进行相关性计算。 $C_{ZNCC}$  的值越接近于 1, 则说明图像子区域相关性越强。对每一张变形图像采用相关公式搜索出与参考图像上各点相关系数最大的位置, 通过各对应点像素坐标的相对变化再结合相机的标定数据经过一定的计算得出相应的应变值。

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中:  $f(x_i, y_j)$  表示参考子区域的灰度分布;  $g(x'_i, y'_j)$  表示目标子区域灰度分布;  $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别表示参考子区域

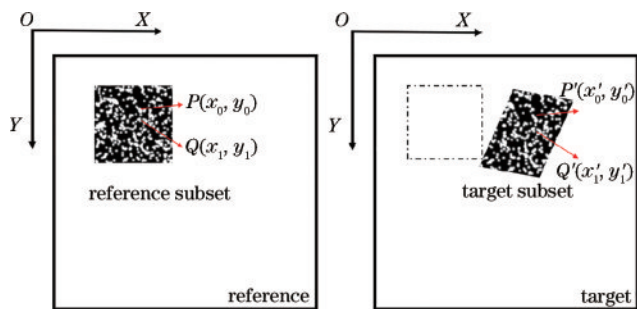


图 1 DIC 原理图

Fig. 1 Schematic of DIC principle

和目标子区域的灰度平均分布。

### 2.2 保护膜层应变测量原理

柔性屏在弯折过程中, 具有弯折半径小、器件受力大、各个膜层间无法协调变形的特点, 严重情况下甚至导致器件剥离, 造成永久性损坏, 因此需要对弯折过程中保护层应变进行测量。为模拟柔性屏折叠行为, 本文设计了一款刚性支撑板, 用来放置和加载屏幕产生弯折变形, 将柔性屏放置于刚性支撑板上, 如图 2 所示。在屏幕表面喷涂随机散斑, 随机散斑以白色显像剂作为底色, 黑色漆作为随机散斑, 如图 3 所示, 由于显像剂易擦除因此不会对屏幕本身造成伤害, 再通过相机对变形过程中的散斑图像进行同步采集, 利用

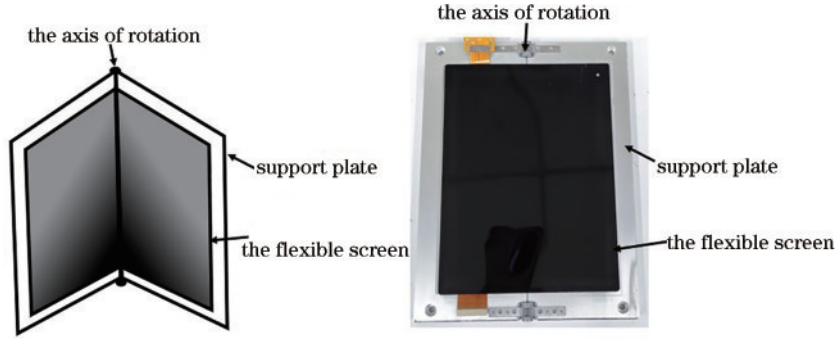


图 2 柔性屏固定方式  
Fig. 2 Mounting method for flexible screen

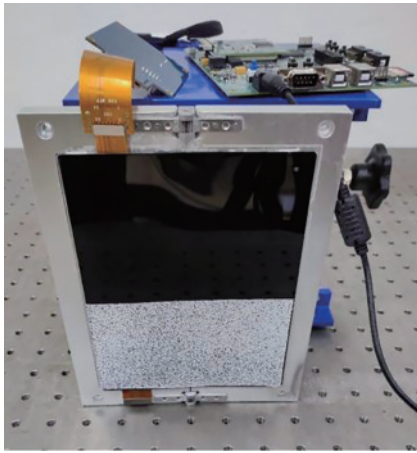


图 3 被测柔性屏  
Fig. 3 Test sample of flexible screen

DIC 算法进行匹配计算, 由于柔性屏在应力作用下发生一定量的应变后, 膜层的散斑位置也会发生变化, 因此由相机同步拍摄屏幕保护膜层的散斑图案, 能同时计算出弯折过程中应变变量。

### 2.3 折叠角度测量原理

对于折叠屏, 在转动时一般通过转轴来实现, 转轴主要有机械卡位和电机驱动等两种主要方式, 而无论哪种转动方式, 想要通过转动动作实现人机交互、功能扩展, 都需要准确检测到转动角度, 进而得到转动平面的实时位置。DIC 技术是一项全场测量技术, 可以获得整个屏幕弯折过程以及屏幕上所有计算点的位置信息。本小节通过简单的平面拟合方程, 拟合两个平面从而计算出弯折过程中的角度。在弯折过程中, 以转轴为界将柔性屏分为 L 面和 R 面, 分别对应的平面法向量为  $\mathbf{n}_L$ 、 $\mathbf{n}_R$ , 如图 4 所示。设 L 面和 R 面平面方程为

$$\begin{cases} \text{L: } A_1(x - x_{L1}) + B_1(y - y_{L1}) + C_1(z - z_{L1}) = 0 \\ \text{R: } A_2(x - x_{R1}) + B_2(y - y_{R1}) + C_2(z - z_{R1}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由于 DIC 技术能实现全场测量, 可获得每个计算点在柔性屏折叠过程中的世界坐标信息, 且柔性屏在弯折过程中发生的是刚性偏转, 因此会保证表面平面度不变。根据以上分析, 选择 L 面和 R 面任意 3 个不

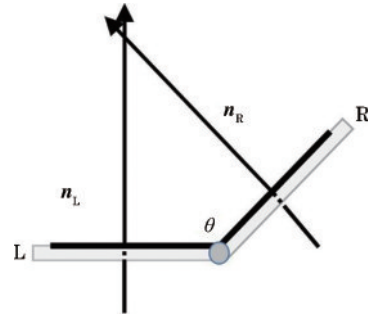


图 4 弯折结构几何模型图  
Fig. 4 Geometric model of bending structure

共线的点即可拟合出对应平面方程。以 L 面为例,  $(x_{L1}, y_{L1}, z_{L1})$ 、 $(x_{L2}, y_{L2}, z_{L2})$ 、 $(x_{L3}, y_{L3}, z_{L3})$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} x - x_{L1} & y - y_{L1} & z - z_{L1} \\ x_{L2} - x_{L1} & y_{L2} - y_{L1} & z_{L2} - z_{L1} \\ x_{L3} - x_{L1} & y_{L3} - y_{L1} & z_{L3} - z_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

此方程组有非零解的充要条件是关于  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  的系数行列式等于 0, 即

$$\begin{vmatrix} x - x_{L1} & y - y_{L1} & z - z_{L1} \\ x_{L2} - x_{L1} & y_{L2} - y_{L1} & z_{L2} - z_{L1} \\ x_{L3} - x_{L1} & y_{L3} - y_{L1} & z_{L3} - z_{L1} \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

然后即可分别求得 L 面和 R 面的平面方程, 两平面方程的法向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_L: (A_1, B_1, C_1) \\ \mathbf{n}_R: (A_2, B_2, C_2) \end{cases} \quad (5)$$

进而, 两平面夹角如下:

$$\cos \theta = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \times \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \quad (6)$$

## 3 实验系统

由于单纯采用传统的理论分析难以对弯折过程中的受力和变形情况进行计算求解, 且多数只能获得初始时刻和最后时刻的屏幕状态, 无法完整呈现弯折过程。针对此问题, 本文设计了一种全场柔性屏弯折变形、应变测量系统, 可以完整呈现柔性屏弯折过程中屏

幕全场变形状态。系统结构如图 5(a)所示,由双 CCD 相机(AVT Stingray F-201B/C)、柔性屏、支撑板、控制芯片等组成。实物图如图 5(b)所示。该系统具有结构简单、易于调节、计算精确度高、环境适应性好等优点,适用于全场非接触无损检测。具体实验步骤如下:

1)将被测柔性屏固定于支撑板上,屏幕上下两部分喷涂随机散斑图像;

2)调整双相机位置,使被测屏幕位于 CCD 视窗中心且能清晰成像后,开始相机标定,选用张氏标定法进行相机标定<sup>[16]</sup>;

3)对屏幕进行弯折加载,同时双相机开始图像采集,采集每个弯折阶段的屏幕图像,弯折结束后,图像停止采集,进行 DIC 计算,子集大小为 31 pixel×31 pixel,步长为 9 pixel,获取被测屏幕应变数据。

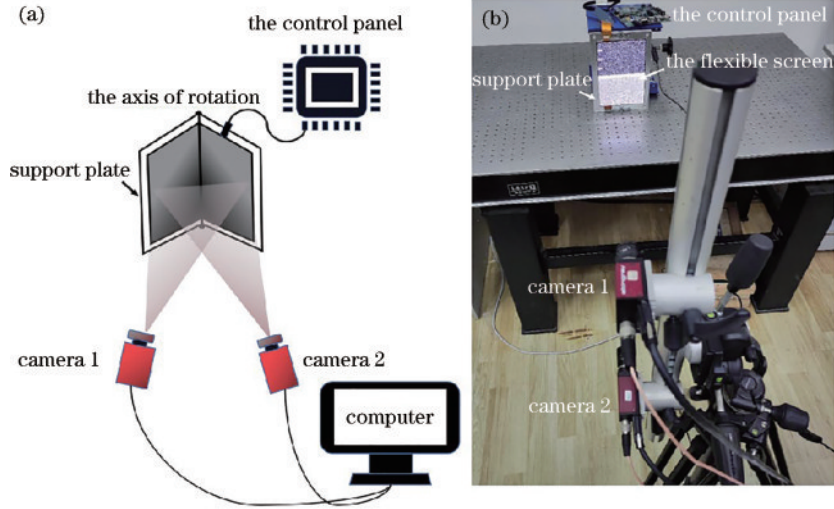


图 5 实验系统图。(a)原理图;(b)结构图

Fig. 5 Experimental setup. (a) Schematic; (b) structure

#### 4 实验结果

采用支撑板驱动柔性屏弯折的方式对屏幕进行加载。首先,在屏幕加载前拍摄一组参考图片,然后支撑板开始驱动柔性屏弯折,同时相机开始自动拍摄,直至实验结束。将获取到的图像进行 DIC 计算,获取柔性屏弯折过程中的全场应变分布云图。

图 6 为柔性屏工程主应变演化云图,表 1 为计算所得的屏幕对应的弯折角度,由云图颜色梯度分布可以看出,随着弯折角度的增加,应变的非均质性开始增加,当角度到 160°左右时,应变局部化分布逐渐形成,

并开始集中分布于折痕处,其他区域相对于平铺时,虽开始有零散应变分布但总体远小于折痕处,应变不明显。当角度为 124°左右时,折痕处应变局部化现象明显出现,其他平铺区域随机出现应变集中点,至折叠角度为 72°左右时,折痕处出现明显的应变集中现象,虽然应变量相较弯折角度较小时,有了显著增大,但依然远小于折痕处。上述现象说明,屏幕弯折时,应力主要集中于折痕处导致应变集中,且屏幕保护层应变集中在折痕处,这解释了文献[6]中提出的当柔性屏受到压缩和拉伸应力时,众多膜层结构中屏幕显示层的光学器件是最容易损坏的原因。由于屏幕各膜层之间一般

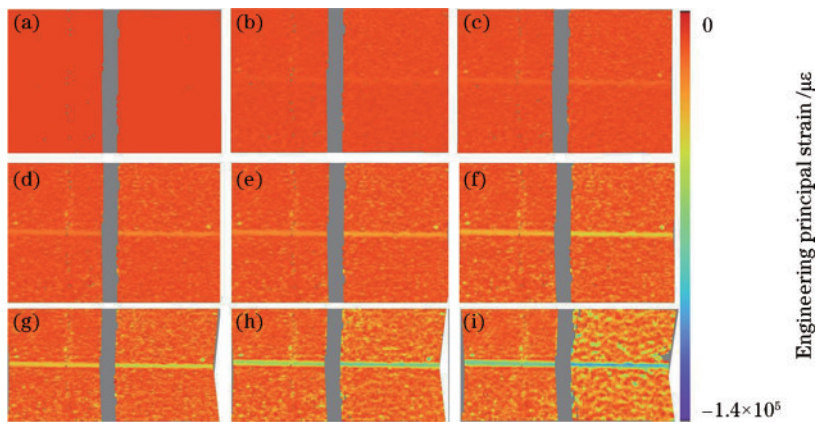


图 6 工程主应变演化云图

Fig. 6 Evolution cloud diagram of principal engineering strain

表 1 弯折角度

Table 1 Bending angles

unit: (°)

Picture	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
Angle	180.00	167.18	160.13	149.53	138.88	124.08	115.03	90.65	72.85

由 optically clear adhesive (OCA) 胶粘连, 参考文献 [21], 可考虑在显示层添加 foldable OCA, 这种材料在柔性屏折叠时提供更小的应力, 该特性将降低折叠器件所需的力, 并将器件折叠时临界层的应变最小化, 从而延长显示层使用寿命。

图 7 为在保护层折痕处分别选取 5 个点所绘制的时序应变演化曲线。在弯折初期各点应变变化不明显, 随着时间的增加, 折叠角度增大, 折痕处应变也逐渐增大, 表现为各点应变急剧增加, 这与图 6 所对应的应变演化云图趋势一致。

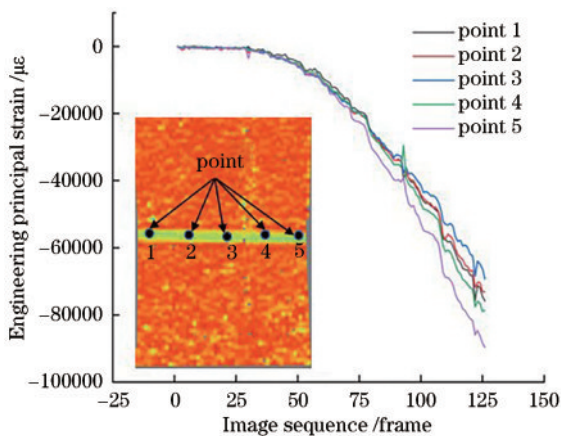


图 7 保护层折痕处点应变演化曲线图

Fig. 7 Strain evolution curve graph at the folding point of the protective layer

为进一步探究柔性屏在折叠过程中位于折痕处的应变集中现象, 在保护层绘制一条线段, 图 8 绘制了线段对应的空间应变曲线, 结合应变云图可以看出, 屏幕发生了明显的非均匀应变。应变曲线中段出现峰值, 表示应变较大, 对应云图应变集中区域, 说明应力集中在该区域导致非均匀性应变产生, 同理线段两端应

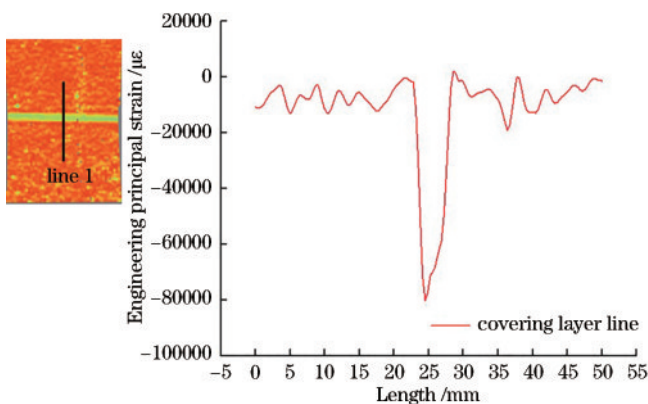


图 8 空间应变曲线图

Fig. 8 Spatial strain curve

变量较小则说明对应区域未出现明显的应力集中现象, 应力分布远小于屏幕折痕处, 这与图 7、图 8 的分析结果是一致的。

当前, 柔性屏技术日趋成熟, 新型折叠屏手机正蓬勃发展, 本文采用 DIC 技术将理论分析、实验研究结合, 帮助研究人员了解到问题的本质, 与单纯的理论和模拟分析相比, 对事件的研究更加真实、细致、全面。得益于 DIC 的全场测量性质, 研究人员不仅可以分析测试的结果, 而且对于整个动态变化的过程都有可靠的显示, 将难以观察、测量到的结果直观呈现, 帮助人们理解和研究。当然, 本文所获得柔性屏弯曲过程中的保护层应变无法代表其应力的变化, 更准确地获得弯折过程中的应力状况还需要结合仿真计算各层的应变和材料参数。此外, 不同膜层在弯曲过程中应力应变变化趋势, 也将在后续工作中进一步验证。

## 5 结 论

提出一种基于数字图像相关的柔性屏弯折应变测量方法。通过 DIC 技术跟踪膜层上事先赋予的散斑信息, 解算出保护层的弯折角度与全场应变信息。随着弯折角度的增大, 柔性屏应变集中区域逐渐向折痕处偏移, 当弯折角度为 160° 时, 开始出现了非均匀性应变, 并随着弯折角度的增大应变集中现象逐渐明显。所提方法为柔性屏弯折过程应变的全场无损测量提供了一种行之有效的测量手段, 该方法可以对柔性屏的制造、维护, 以及成型进行有效的指导, 为柔性屏弯折应变的有限元模拟以及理论推断提供现实参考。

## 参 考 文 献

- [1] Saleh R, Barth M, Eberhardt W, et al. Bending setups for reliability investigation of flexible electronics[J]. *Micromachines*, 2021, 12(1): 78.
- [2] 王承遇, 卢琪, 陶瑛. 柔性玻璃在折叠式手机中应用趋势[J]. *玻璃与搪瓷*, 2019, 47(5): 48-52.  
Wang C Y, Lu Q, Tao Y. Application trend of flexible glass in folding mobile phone[J]. *Glass & Enamel*, 2019, 47(5): 48-52.
- [3] 马东阁. OLED 显示与照明: 从基础研究到未来的应用 [C]//2014 武汉光电论坛. 武汉: 武汉光电国家研究中心, 2014.  
Ma D G. OLED displays and lighting: from fundamental research to future applications[C]//The 2014 Wuhan Optoelectronics Forum. Wuhan: Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, 2014.
- [4] 孙阿辉, 李耀召, 陈果, 等. 基于深蓝光激基复合物构筑的 OLED 植物照明光源[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0423001.

- Sun A H, Li Y Z, Chen G, et al. Organic light-emitting diodes based on deep-blue exciplex for plant growth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0423001.
- [5] 潘赛虎, 于航, 赵云平, 等. 金属纳米颗粒的导入对顶发射 OLED 光取出影响的 FDTD 模拟与研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0916001.  
Pan S H, Yu H, Zhao Y P, et al. FDTD simulation and study on effect of metal nanoparticle introduction on light extraction of top-emitting OLED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0916001.
- [6] 朱毅翀, 季渊. 基于非对称椭圆中心凹 JND 模型的硅基微显示器[J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1909002.  
Zhu Y C, Ji Y. OLED-on-silicon micro-display based on asymmetric elliptical foveated JND model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1909002.
- [7] Kang M S, Joo M K, Lee J H, et al. 66.1: performance of a large-size white OLED for lighting application[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 972-974.
- [8] 谷朋浩, 史世明, 蔡宝鸣, 等. 浅析折叠屏幕材料及难点[J]. *微纳电子与智能制造*, 2020, 2(2): 112-119.  
Gu P H, Shi S M, Cai B M, et al. Analysis of folding screen materials and difficulties[J]. *Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2020, 2(2): 112-119.
- [9] Niu Y F, Liu S F, Chiou J Y, et al. 78-2: improving the flexibility of AMOLED display through modulating thickness of layer stack structure[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1045-1047.
- [10] 刘正周, 廖敦明, 贾永臻, 等. 可折叠 OLED 屏幕的弯折应力仿真[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(7): 555-560.  
Liu Z Z, Liao D M, Jia Y Z, et al. Bending stress simulation of foldable OLED screens[J]. *Liquid Crystal and Display*, 2018, 33(7): 555-560.
- [11] 郑宏兵, 汪洋, 王宁, 等. 基于 COF 区弯折的柔性屏金属层应力影响因素分析[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1121-1127.  
Zheng H B, Wang Y, Wang N, et al. Analysis of metal layer in flexible screen on COF bending[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1121-1127.
- [12] Lin S F, Nguyen D H, Chao C P. Prediction of OLED temperature distribution based on neural network model[J]. *Microsystem Technologies*, 2022, 28: 2215-2224.
- [13] Wu D, Shi J K, Chen J P, et al. P-10.3: structural optimization method of foldable AMOLED panel based on mechanical theory[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52: 574-577.
- [14] Niu L R, Ding J, Liu W. Analysis on the mechanical behavior of flexible screens[J]. *Materials*, 2022, 15(8): 2829.
- [15] Campbell C J, Clapper J, Behling R E, et al. P-198: optically clear adhesives enabling foldable and flexible OLED displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 2009-2011.
- [16] Wang B, Zhang Z Y, Su W W, et al. The influence of the bending mode on the mechanical behavior of AMOLEDs[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 152442-152448.
- [17] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [18] Peters W H, Ranson W F, Sutton M A, et al. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. *Optical Engineering*, 1983, 22(6): 2267-2273.
- [19] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [20] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 2002: 666-673.
- [21] Cashion M P, Park T, Long T E. Influence of hydrogen bonding on the adhesive properties of photo-curable acrylics[J]. *The Journal of Adhesion*, 2009, 85(1): 1-17.