

基于像素偏振相机的新型光弹技术：原理与应用

摘要：工程中有许多场合要测试玻璃/钢化玻璃中的残余应力，但传统的光弹性方法在实际应用中有很多局限，比如：要求避强光，不能实时测量等。但随着基于像素偏振相机的光弹性方法的出现，这些局限有望得以突破。本文首先介绍了基于像素偏振相机的新型光弹技术在应力测试方面的原理、技术特点和优势，并通过两个实验对这些优势进行了验证和评价。文章最后给出了该新型光弹技术的若干前瞻性应用建议，展示了该新型技术在工程中的巨大应用潜力。

关键词：光弹性，玻璃，应力，像素偏振相机；

1. 前言

光弹性方法是测试试件内部应力的重要方法之一，全场性和非接触性是其主要的优点。但该方法主要局限于实验室应用，很少见到它在工业现场或场外环境中发挥作用，主要原因在于以下几点：首先硬件方面，传统设备的集成化程度不高，不便于携带；其次，定量测试操作复杂，需要多次、多角度转动光学元件（如典型的六步相移法[1]），难于在工业环境，特别是需要在线测试的环境中应用；最后一点，传统光弹法的信息载体是干涉条纹，当环境光比较强烈而试件内部的应力又比较小的时候，干涉条纹对比度极小，测试结果很难精确读取。为了克服这些缺点，特别是提高光弹法定量测试的效率，Asundi [2] 和 Kramer [3] 分别采用了分孔径和分振幅的方法将通过试件的出射光分成四束，分别设置每束光路的偏振状态后又将这四束光同时成像于同一个 CCD 靶面的不同区域，进而实现了动态相移。这两种技术的缺点是试件成像尺寸受到限制，而且每更换/调整一下成像镜头或都要重新进行像素匹配，另外文献[3]的光路对系统防震也有要求，一般生产现场难于满足，因此这两项技术未见大量的工程应用。

近些年来随着科技的发展，上述技术难题逐渐得以解决。首先是高分辨率像素偏振相机[4]的出现使得动态相移的实现非常便捷。像素偏振相机是通过聚焦离子束（FIB）等微纳加工手段制作的金属纳米光栅作为偏振片并直接置于 CCD 靶面的每个感光单元前，光的偏振方向取决于栅线方向 [5]。该相机以相邻的上下左右四个感光单元为一组，偏振方向分别设为 0°、45°、90°、135°。通过软件可以将每组中某个特定偏振方向的感光单元的像素值抽取出来组成一个图像，这样无需复杂的光路设置，只需一次正常条件下的拍照就可以同时获得四幅不同偏振方向的图像。近两年开始在国内销售的像素偏振相机多采用 Sony IMX250MZR 芯片，空间分辨率为 2448×2048 像素，单幅偏振图像的分辨率也达到了 1224×1024 像素的水平，这个分辨率已经可以忽略四幅偏振图像之间一个像素的匹配误差。像素偏振相机在三维形貌测试[6]、光漩涡测量[7]、生物组织的偏振特性测试[8]等方面的应用已经成为国内外近几年的研究热点。在动态光弹应力测试领域，像素偏振相机 [9-11]的应用已经有所报道，但国内相关的应用研究尚未开展起来。相关测试设备方面，目前只有日本一家公司的产品在国内销售，且售价昂贵。

作者在国家自然科学基金的资助下开展了相关研究，现将其中的一些研究成果，包括测试原理以及一些典型应用做些介绍。

2. 测试原理

在偏振光学的方法中，通常以 4x4 的 Muller 矩阵（**M**）表征光学元件的偏振特性，以 4x1 的 Stokes 矢量（**S**）表示光的偏振状态，通过矩阵相乘可以获知入射光 **S**₀ 通过一系列光学元件（**M**₁，**M**₂...**M**_n）后的偏振状态 **S**。

$$\mathbf{S}=\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_n \cdot \mathbf{S}_0 \quad (1)$$

相比于光测力学中常用 Jones 向量和矩阵表示法，偏振光学的上述方法在研究光偏振状态的传递特性方面能提供更多、更完善的信息量。一般线偏振器件的 Muller 矩阵表达式为（其中θ为偏振轴的方位角）：

$$P_{\theta}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos ^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

而一般相位滞后器的 Muller 矩阵表达式为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} + \cos^2 \frac{\delta}{2} & \sin 4\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 4\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} & -\cos 4\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} + \cos^2 \frac{\delta}{2} & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 δ 为滞后的相位值，而 θ 为器件的光轴方位角。对于 1/4 波片而言， $\delta = \pi/4$ ，在光弹光路里 θ 通常为 $\pm 45^\circ$ 。

在图 1 所示的光路中，如果令检偏镜的偏振轴方位角 α 分别为 0° ， 45° ， 90° 和 135° ，则按照公式 (1) 的计算，Stokes 矢量为 $(1,0,0,0)^T$ 的自然光通过起偏镜、1/4 波片、试件以及检偏镜后，出射光的 Stokes 矢量分别为：

$$S_{0^\circ} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 - \sin 2\theta \sin \delta \\ 1 - \sin 2\theta \sin \delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{45^\circ} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 + \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{90^\circ} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 + \sin 2\theta \sin \delta \\ -1 - \sin 2\theta \sin \delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{135^\circ} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 - \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

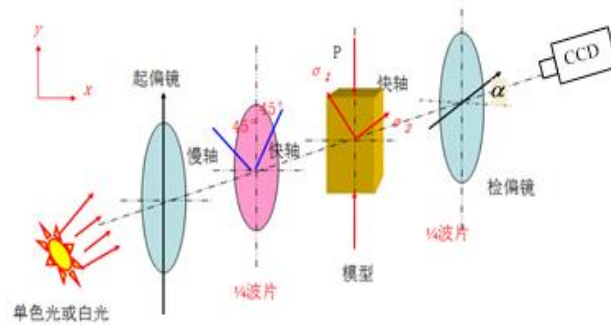


图 1. 基于像素偏振相机的光弹法原理图

我们把 CCD 相机在分析镜 4 种角度下记录到的光弹条纹场记为： I_0 ， I_{45} ， I_{90} ， I_{135} 。

由于 Stokes 矢量的第一个元素表示通过透光率为 0.5 的玻璃的光强值，那么显然有：

$$\begin{aligned}
I_{0^\circ} &= \frac{1}{2}(1 - \sin 2\theta \sin \delta), I_{45^\circ} = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta \sin \delta) \\
I_{90^\circ} &= \frac{1}{2}(1 + \sin 2\theta \sin \delta), I_{135^\circ} = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta \sin \delta)
\end{aligned} \tag{5}$$

我们定义：

$$\begin{aligned}
S_0 &= I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = 1 \\
S_1 &= I_{0^\circ} - I_{90^\circ} = -\sin 2\theta \sin \delta \\
S_2 &= I_{45^\circ} - I_{135^\circ} = \cos 2\theta \sin \delta
\end{aligned} \tag{6}$$

再定义线偏振度（Degree of Linear Polarization, DoLP）

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \sin \delta \tag{7}$$

这样利用图 1 所示的光路，将分析镜分别转至 4 个特定角度进行拍摄，我们就可以利用公式（7）获取试件的相位差场。偏振相机的出现则将这个工作简化了，在省去分析镜及其旋转操作的情况下，仅仅通过一次拍摄即可获取 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、以及 I_{135} ，进而得到试件内部的相位差场。

3. 新光弹方法的技术特点与优势

相比于传统的光弹性方法，新方法具有如下优势：

A. 测试系统结构简单，定量测试快捷，便于工业现场应用

在图 1 中，可以将光源与起偏镜以及 1/4 波片集成在一起，尤其是薄膜圆偏振片的出现使得这种集成更加便利，这样从结构上看，新系统就只有集成光源和像素偏振相机两个构件，便于现场安装测试。另外新方法仅仅通过一次拍照即可通过公式（7）计算出试件的相位差场，避免了传统相移方法光学元件的旋转操作，且即使采用普通配置的计算机，也能基本实现相位差场和主应力方向场的实时计算。因此相对于传统光弹技术，新方法/新系统结构简洁，测试快捷，非常便于工业现场使用。

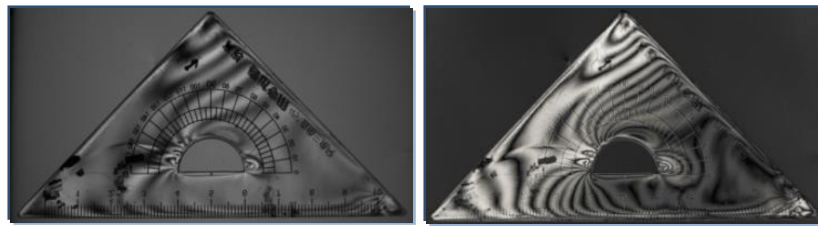
B. 灵敏度高

这里有两个含义，一是指它的测试灵敏度高：以 DOLP 为测试目标并以图像形式加以记录，可以发现 Dolp 图像的灰度变化与相位差的正弦值成正比（即 $I \sim \sin \varphi$ ，见公式 7），而一般光弹条纹图的灰度是与相位差一半的正弦函数平方成正比（即 $I \sim \sin^2(\varphi/2)$ ），灵敏度提高了一倍，实验验证结果见图 2(a)；另一层

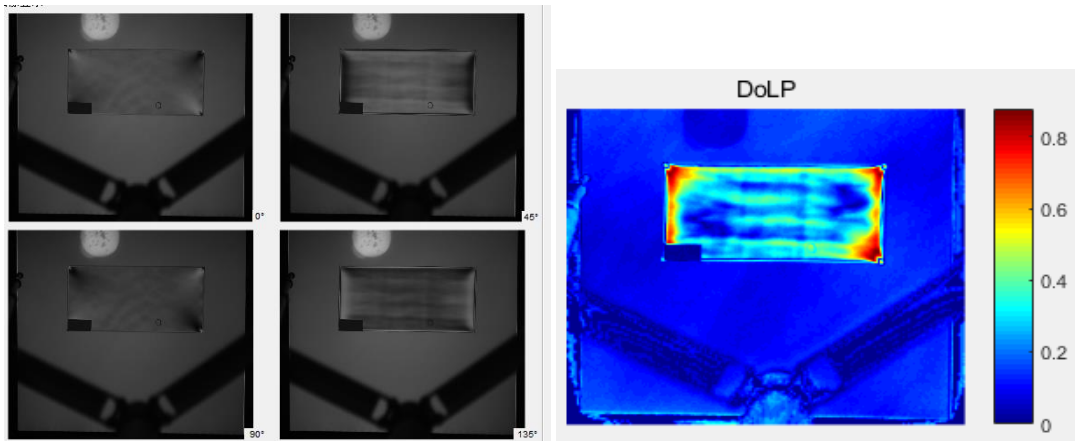
意思是指无论测试结果多小，都能以灰度足够且层次分明的图像来实时显示，即显示灵敏度高，不易遗漏关键信息，而由于无法实时获取测试结果，传统光弹条纹场图像很难选择合适参数进行实时增强显示。

C. 抗环境光干扰能力强

从公式（6）可以看出，由于采用了 4 幅图像之间的相减运算，新技术具有一定的抗环境光的干扰能力，在图 2（b）所示 4 个偏振图上的灯泡倒影，在 DOLP 图上几乎看不到任何影响。这样即使在光线充足的环境里，测试也可以照常进行。



(a) 传统光弹条纹图与新光弹条纹图（DOLP 场图）的对比



(b) 带有反射灯光（左上）的 4 幅原始偏振图与计算的 DOLP 图(试件为钢化玻璃)

图 2 新光弹方法在应力测试方面的优势展示

新光弹技术的局限性主要有两点：一是 CCD 靶面前的微纳光栅偏振器件的消光比不高。在可见光波长范围内，它对蓝光的消光比最高，也只有 180:1，这个消光比在偏振光学元件里属于较低水平，它使得 DoLP 的测试值偏低；如图 3 所示，标准 1/4 波片的 DoLP 理论值应该为 1.0，实测值在 0.96 左右，对应的相位测试误差达到 10%，但试件实测的 DoLP 除以该值（即 0.96）即可消除该误差，详见参考文献【12】；二是与传统的光弹法和相移法相比，新技术的量程较小：

由公式 (7) 可以看出, 当相位差大于 $\pi/2$ 时, 相位差已经不能用 DOLP 的反正玄函数求得, 需要解包裹处理。

4. 新光弹技术的应用实例

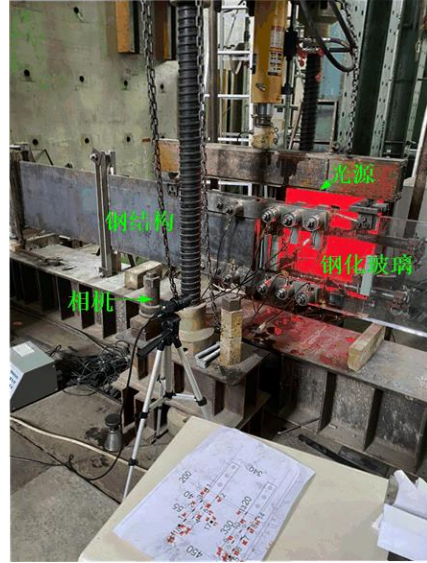
4.1 钢化玻璃螺栓群周围应力场的实时检测

钢化玻璃在现代建筑中广泛应用, 它与钢结构通常采用穿孔连接: 即用金属螺栓穿过钢化玻璃并拧紧固定, 螺栓与玻璃直接接触。这种连接方式容易在玻璃孔与螺栓的接触点处产生应力集中, 进而发生破坏。近年来, 建筑科学工作者对这种连接方式提出了改进措施: 即先把开孔周围的钢化玻璃表面打磨(见图 3(a)) 然后粘贴上软质的铝制金属板, 再用钢板通过拧紧的螺栓将钢结构与钢化玻璃连接(见图 3(b)(c))。铝板和钢板上的开孔尺寸比玻璃上的略小, 这样螺栓将不与玻璃直接接触, 结构载荷以摩擦力的形式传递给玻璃, 避免了之前的应力集中现象。为了验证这种改进的有效性, 相关科研人员以上述连接方式制作了钢-钢化玻璃梁, 对其施加四点弯曲载荷并测试结构的强度是否得以提高, 同时探索以下问题: 多个螺栓连接的情况下, 哪个螺栓周围的应力最大并最先发生破坏? 最大应力与铝板的形状以及螺栓预紧力的关系? 这些问题的探索将对连接方式的进一步优化提供依据。我们采用新光弹技术对试件内部的机械应力和固有的残余应力进行了全场测试。从图 3(b)可以看出, 测试现场光线充足, 试件与加载机构之间的空间狭小, 仅能放下一个光源, 这种情况下传统光弹设备很难施展开来, 但新光弹方法恰好可以发挥它的技术优势。我们采用的 600mm*500mm 红色光源覆盖了钢化玻璃试件上的两排共计 6 个螺栓, 对其周围的应力场及其随载荷的变化进行了实时跟踪和评估, 图 3(d)(e)是试件在两个不同载荷下的 DOLP 场图。尽管受到连接横版、脚手架以及玻璃上众多传感器引线的遮挡, DOLP 场图仍然为我们提供了如下有用的信息:

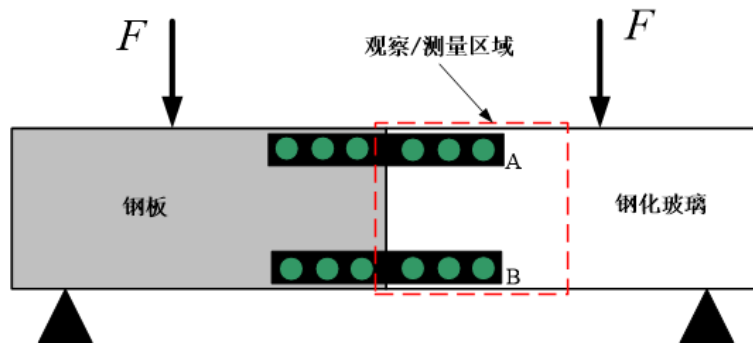
- (1) 相对于玻璃上的其它螺栓, #1 和#4 螺栓在机械加载过程中周围的条纹数目较多且增加明显(加载前的条纹是由于重力引起的), 说明这两个螺栓主要承载, 螺栓周围玻璃的内部应力也较大。
- (2) 在连接板的右下角(即 A,B 点)处条纹密集, 说明此两处有应力集中, 钢化玻璃应该首先从此处破坏。



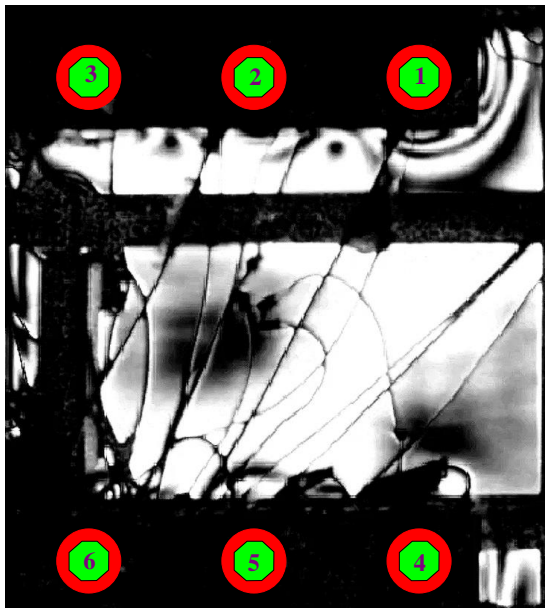
(a) 开孔周围做磨砂处理后的钢化玻璃试件



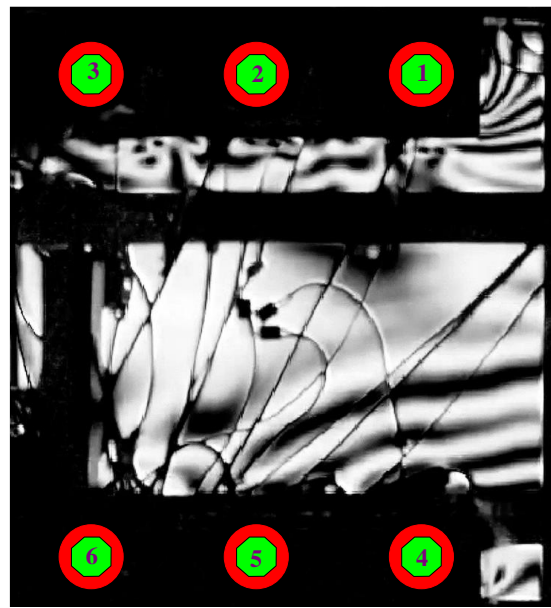
(b) 测试现场和系统安放示意



(c) 钢-钢化玻璃连接件的加载及测试区域示意图



(d) 加载开始前的 DOLP 场



(e) 加载 10KN 后的 DOLP 场

图 3. 新光弹技术对钢-钢化玻璃结构受载过程中的内部应力场的实时监测

在本项试验中，新光弹技术的实时性、全场性以及残余应力和机械应力兼顾的测试模式，为钢-钢化玻璃连接工艺的优化和强度评估提供了很好的实验依据。

4.2 玻璃光弹系数的测定

光弹系数是玻璃光学性能的重要指标。但由于玻璃的光弹效应普遍很弱，传统的光弹系统很难满足精度和灵敏度的测试要求，所以这种测试一般采用国外进口的专用设备，价格极为昂贵。

我们采用新型光弹技术对某型号玻璃的光弹系数进行了测试。设备照片见图 4(a)，光源采用钠光灯（波长 589nm），设备带有简易加载架，以四点弯曲形式加载，试件长宽高分别为 120mm, 10mm 和 10mm。

根据光弹系数（应力-光学系数） C 的定义，平面应力模型上一点处相位差 φ 与该点主应力差的关系为：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} C d (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (8)$$

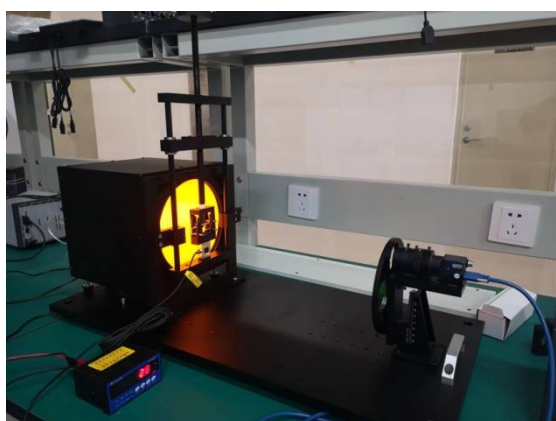
我们以梁上下边缘处 A,B 两点（见图 4(b)）为研究对象，这两点处的非零主应力由弯曲应力公式计算而得而相位差则由系统测得。为了提高计算精度，我们取一组不同的载荷 F ，并分别获取了每个载荷下的 A,B 点对应的应力 σ 和相位差 φ 。其中两组载荷下相位差沿梁高度的分布曲线见图 4(b)和(c)，可以看到分布曲线呈直线且对称分布，曲线上的两个最高点即为 A,B 的相位差 φ ，我们将其取平均处理。可以观察到，在载荷 F 为 75N（对应 A/B 点的应力 3.6MPa）时，A/B 点处的相位差为 1.10 弧度，已经接近新方法的量程上限，不宜继续加载了。在传统光弹方法里，此时 A/B 点的条纹级数还不到 1/4 级，尚未形成对比度明显的干涉条纹，相位差不易获取和判断，这体现了新光弹技术的灵敏度优势。

用得到的一组数据 (σ_i, φ_i) 去拟合公式 (8)，即可得出该型号玻璃的光弹系数。经测试，该型玻璃的光弹系数为 24.9 nm/cm/MPa，与厂家标称值 25.0±1.0 很接近。

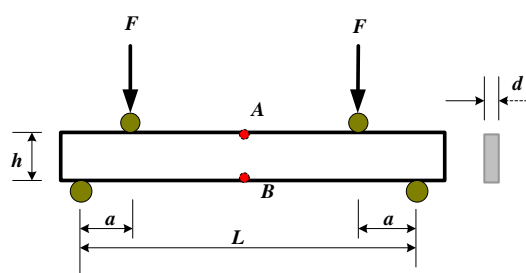
5. 总结与技术展望

本文首先介绍了新型光弹技术的原理和系统组成，并列举了该新型技术的特

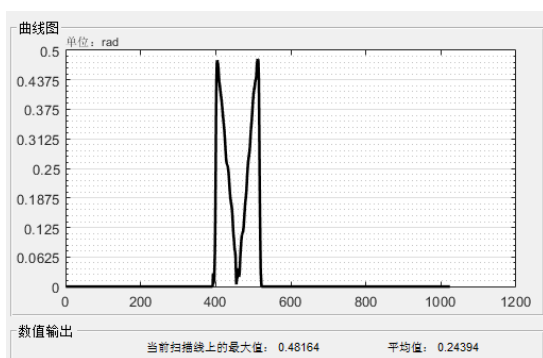
点/优势：结构紧凑、对环境光不敏感、灵敏度高以及实时测量。这些优点使得光弹技术能够走出实验室，面向工程应用。本文给出了两个应用实例，第一个实例是钢-钢化玻璃摩擦连接的强度验证：它实时显示了钢化玻璃内部应力场的分布规律，找出了主要承载螺栓及强度危险点。虽然只是定性分析，但该实例证实了新光弹技术对复杂工程环境的适应性和实时测试特性。另一个实例是玻璃的光弹系数测试，该例子较好地解释了新光弹技术的灵敏度和校正后的系统测试精度。



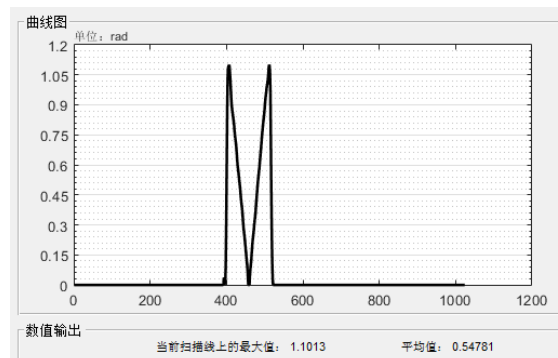
(a) 光弹系数测试系统



(b) 试件加载及测试点位置示意图



(c) F=30N 时，相位差沿梁高度的分布曲线



(d) F=75N 时相位差沿梁高度的分布曲线

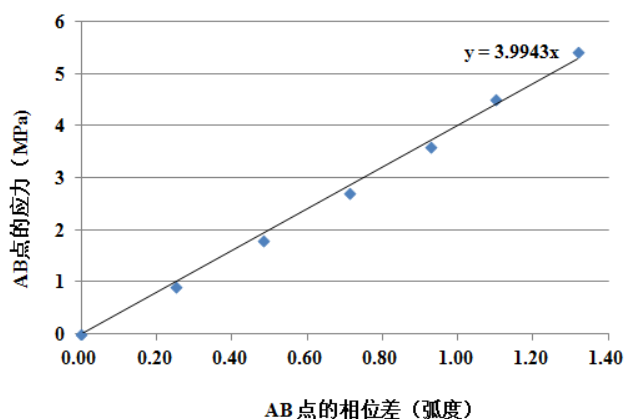


图 4 新型光弹技术用于玻璃光弹系数的测量

除此以外,作者建议并正在尝试一些更多的应用开发工作,比如钢化玻璃在传滚轴传送带上的实时/在线残余应力测试,特别是以局部的应力集中条纹为识别特征的结石缺陷在线检测,如果得以实现将可以大大提高检测效率和产品良率;再比如,将像素偏振相机搭载于无人机上检测玻璃幕墙的安装应力、表面划痕等缺陷,将有可能替代现行的蜘蛛人检测方式,在提高检测效率的同时,大大减少检测成本。

6. 参考文献:

- [1] 雷振坤, 结构分析数字光测力学, 大连:大连理工大学出版社, 2012。
- [2] Asundi A, Tong L, Boay C G. Dynamic phase-shifting photoelasticity [J]. Applied Optics, 2001, 40(22): 3654-3658.
- [3] Kramer S L B, Beiermann B A, White S R, et al. Simultaneous observation of phase-stepped images for photoelasticity using diffraction gratings[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(8): 1343-1355.
- [4] Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, et al. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry [J]. JOSA A, 1999, 16(5): 1168-1174.
- [5] Zhang Z, Dong F, Cheng T, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry [J]. Review of scientific instruments, 2014, 85(10): 105002.
- [6] Aranchuk V, Lal A K, Hess C F, et al. Pulsed spatial phase-shifting digital shearography based on a micropolarizer camera[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 024109.
- [7] Onuma T, Otani Y. A development of two-dimensional birefringence distribution measurement system with a sampling rate of 1.3 MHz. [J]. Optics communications, 2014, 315: 69-73.
- [8] B. Kunnen, C. Macdonald, A. Doronin, S. Jacquese, M. Eccles, and I. Meglinski, “Application of circularly polarized light for non-invasive diagnosis of cancerous tissues and turbid tissue-like scattering media” . J. Biophotonics 8, 317–323 (2015).
- [9] Zhigang Zhang, Fengliang Dong, Kema Qian; “Real-time phase measurement of optical vortices based on pixelated micropolarizer array”, Opt. Express. 2015, 23(16), 20521-20528.
- [10] Sakaue K, Yoneyama S, Kikuta H, et al. Evaluating crack tip stress field in a thin glass plate under thermal load. [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(5):
- [11] Yoneyama S, Kamihoriuchi H. A method for evaluating full-field stress components from a single image in interferometric photoelasticity. [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(7): 075302.

