第 40 卷 第 5 期
2025 年 10 月

实 验 力 学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 40 No. 5
Oct. 2025

文章编号:1001-4888(2025)05-0558-11

基于偏振相机的自动相移光弹测量系统*

王灿[1], 李德威[2], 丁忠军[2], 潘兵[3], 李凯[1]

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200444; 2. 国家深海基地管理中心, 山东青岛 266237; 3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 强度与结构完整性全国重点实验室, 北京 100191)

摘要: 相移光弹法是一种数字化光弹测量技术,十步相移法由于具有较高的测量精度,目前在相移光弹法中得到了广泛应用。然而,十步相移法在测量过程中需采集 10 幅相移图像,且在采图过程中需要人工转动镜片和切换光源,操作复杂,测量效率低。为解决这一问题,本文提出了一种基于偏振相机的自动相移光弹测量系统,该系统利用偏振相机采集图像,用白光和滤波片组合作为光源,通过电控系统控制镜片转动和光源切换,从而实现相移图像的自动高效采集。对圆盘和圆环的实验测量结果表明,本文系统在 5 s 内即可完成 10 幅相移图像的采集,相对于传统测量系统有效地提升了测量效率;此外,实验测量结果同时也证明了系统测量的准确性。

关键词: 光弹性; 相移法; 偏振相机; 自动测量系统

中图分类号: O348.1 **文献标志码**: A DOI: 10.7520/1001-4888-24-126

0 引言

光弹性技术是一种基于光学原理的实验应力分析手段,主要用于研究具有光弹性效应的材料结构的力学特性。该技术在生物力学、半导体器件、断裂力学等领域有着广泛的应用[1]。光弹条纹图可直观地显示被测试件的应力分布,其中,等倾线条纹图包含主应力方向信息,等差线条纹图包含主应力差信息。准确提取光弹条纹的相位信息是光弹性应力分析的基础,围绕该问题,学者们提出了条纹骨架法[2]、正则化方法[3]、RGB(Red/Green/Blue)方法[4]等。这些方法虽各有优势,但求解精度都不高,且算法比较复杂。RBG 方法虽然在低条纹级数时具有较高的求解精度,但是随着条纹级数的升高,会因颜色混叠而失效[5]。相移法由于计算简单且精度高,已在光弹性测量中得到了广泛应用。HECKER 等[6]在光弹性测量中使用相移法,并通过采集 5 幅相移图像实现了等差线相位的获取。PATTERSON 等[7]在文献[6]的基础上提出了六步相移法,并通过该方法成功获得了等倾线和等差线条纹相位。然而,由于等差线会耦合在等倾线中,六步相移法求解出的等倾线相位中会含有锯齿状噪声,为解决此问题,PETRUCCI[8]提出了白光四步相移法,雷振坤等[9-10]提出了五步彩色相移法,钟振威等[11]提出了多次加载六步相移法,这些方法都成功消除了等倾线条纹中的锯齿状噪声。此外,学者们还围绕相移法的相位解包裹、误差分析及拓展应用等问题进行了研究[12-15]。

目前,十步相移法在光弹性测量中应用较为广泛,该方法由白光四步相移法和单色光六步相移法结合而成,具有较高的测量精度[16]。然而,该方法在测量过程中需要采集 10 幅相移图像,采图过程中还需要人工切换光源和转动镜片,操作复杂,测量效率低。为提升十步相移法的测量效率,文献[17]采用 4 个相机并结合特定的测量光路,实现了 4 幅相移图像的同时采集,这种方法虽然提升了测量效率,但

* **收稿日期**: 2024-08-13; **修回日期**: 2024-12-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2802100)
通信作者: 李凯(1978—),男,博士,副教授。主要研究领域:实验力学。Email: likai@shu.edu.cn

是同时使用 4 个相机进行采图，增加了系统的硬件成本和控制难度，不易应用。为解决这一问题，ASUNDI 等[18]利用多光谱成像仪，KRAMER 等[19]借助衍射光栅的分光特性，分别只用 1 个相机实现了同时采集 4 幅相移图像，这 2 种方法虽然避免了多相机的使用，但测量光路比较复杂，且降低了相移图像的空间分辨率。邱川等[20]发现十步相移法中的 10 幅相移图并不相互独立，某些相移图可以用其他相移图组合得到，因此提出了混合六步相移法，该方法只需采集 6 幅相移图像即可完成十步相移法的相位测量，实验结果也证实了该方法的有效性，然而，该方法依旧需要人工切换光源和转动镜片，操作依然复杂。

近年来，偏振相机的出现为光弹性方法的发展提供了新的契机。偏振相机是一种在 CCD(Charge Coupled Device)或 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)芯片前安装了像素化微偏振阵列的新型相机，它能够同时采集目标物体在 4 个方向上的偏振信息，从而大幅提升光学测量中偏振信息的采集效率[21]。目前，在利用偏振相机进行光弹性测量方面已取得很多有益的成果，如：ONUMA 等[22]利用偏振相机实现了高速偏振图像的采集，并将此方法成功应用于动态实验测量；REN 等[23]利用偏振相机连续采集试件在加载过程中的图像，成功获得了加载过程中等差条纹相位场的动态变化特征；XU 等[24]利用偏振相机采集 4 幅图像，并从这 4 幅图像中提取出十步相移法所需的 10 幅相移图像，提升了十步相移法的测量效率；ZHANG 等[25]利用彩色偏振相机采集图像并结合 RGB 光弹法，实现了瞬时的光弹测量。此外，学者们还对利用偏振相机进行光弹性测量的精度问题开展了研究[26-27]。

本文针对十步相移法操作复杂、测量效率低的问题，提出一种基于偏振相机的自动相移光弹测量系统。该系统利用偏振相机采集图像，并用白光和滤波片组合作为光源，通过电控系统控制镜片转动和光源切换，实现了相移图像的自动高效采集。对圆盘进行的对径受压实验测量表明，本文提出的测量系统在 5 s 内即可完成 10 幅相移图像的采集，与传统的测量系统相比，有效提升了测量效率；此外，实验测量结果也证实了本文提出的测量系统具有良好的测量精度。

1　基于偏振相机的十步相移光弹原理

偏振相机是一种在 CCD 或 CMOS 感光芯片前安装像素化微偏振阵列的新型相机[28]，如图 1 所示，偏振相机中相邻的 4 个像素组成 1 个 2×2 的感光单元，感光单元中的 4 个像素分别用于提取 0°、45°、90°、135°方向的偏振信息，因此，偏振相机采集的每幅图像，可以通过抽取像素的方式生成对应 4 个偏振方向的 4 幅偏振图像。在光弹性测量中使用偏振相机，通过 1 次采图即可完成 4 个方向的偏振信息采集，有效提升了光弹性测量的效率。

光弹性十步相移法由白光四步相移法和单色光六步相移法结合而成，本文采用文献[24]中的光路进行十步相移法测量。图 2 给出了测量等倾线相位的白光四步相移法光路。测量过程中，偏振相机在起偏镜 P 的偏振轴与水平 x 轴的夹角分别等于 45°和 90°时，采集 2 幅图像，每幅图像可以提取出对应偏振角度为 0°、45°、90°和 135°的 4 幅偏振图像，因此一共得到 8 幅偏振图像。这些图像对应的光强表达式可由光弹性理论推导得出[9-10]，具体见表 1，表中 I_i 表示第 i 幅图像的光强；I_a 为光源光强；I_b 为背景光强；θ 为试件中第一主应力 σ_1 与水平 x 轴的夹角；δ 为试件中第一主应力 σ_1 与第二主应力 σ_2 产生的相位差。

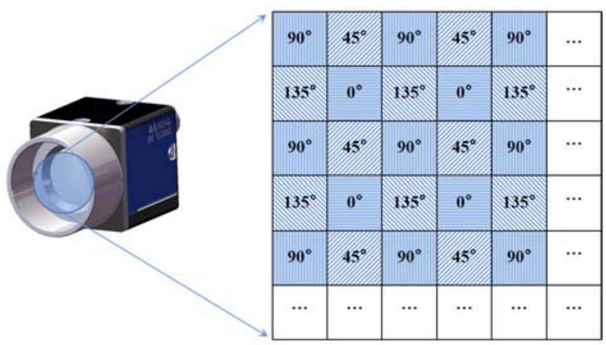

图 1　偏振相机的像素化微偏振阵列

Fig. 1　A pixelated micropolarizer array for polarizing cameras

图 3 给出了测量等差线相位的单色光六步相移法光路，其中，F 表示 1/4 波片的快轴；S 表示 1/4 波片的慢轴；γ 为快轴与水平 x 轴的夹角。测量过程中，起偏镜 P 与水平 x 轴的夹角固定为 90°，1/4 波

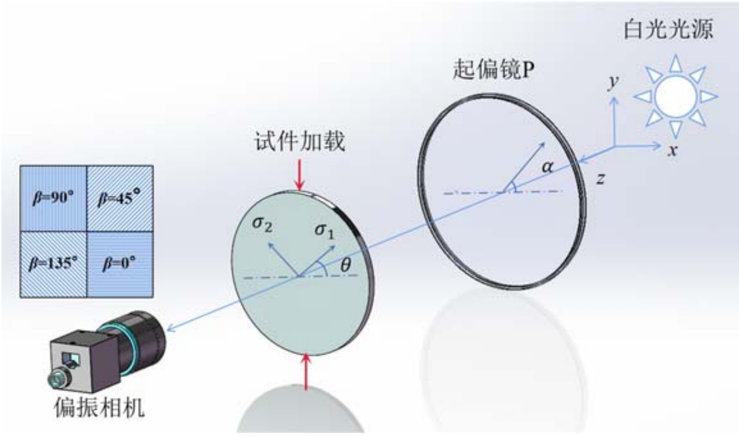

图 2 白光四步相移法光路

Fig. 2 Optical path of the white light four-step phase-shift method

表 1 白光四步相移法记录的光强等式

Tab. 1 Light intensity equation recorded by the white light four-step phase-shift method

采图序号	α	β	光强表达式 I_i
1	45°	0°	$I_1=I_b+I_a[1+\sin 4\theta\sin^2(\delta/2)]/2$
		45°	$I_2=I_b+I_a[\cos^2(\delta/2)+\sin^2 2\theta\sin^2(\delta/2)]$
		90°	$I_3=I_b+I_a[1-\sin 4\theta\sin^2(\delta/2)]/2$
		135°	$I_4=I_b+I_a\cos^2 2\theta\sin^2(\delta/2)$
2	90°	0°	$I_5=I_b+I_a\sin^2 2\theta\sin^2(\delta/2)$
		45°	$I_6=I_b+I_a[1-\sin 4\theta\sin^2(\delta/2)]/2$
		90°	$I_7=I_b+I_a[\cos^2(\delta/2)+\cos^2 2\theta\sin^2(\delta/2)]$
		135°	$I_8=I_b+I_a[1+\sin 4\theta\sin^2(\delta/2)]/2$

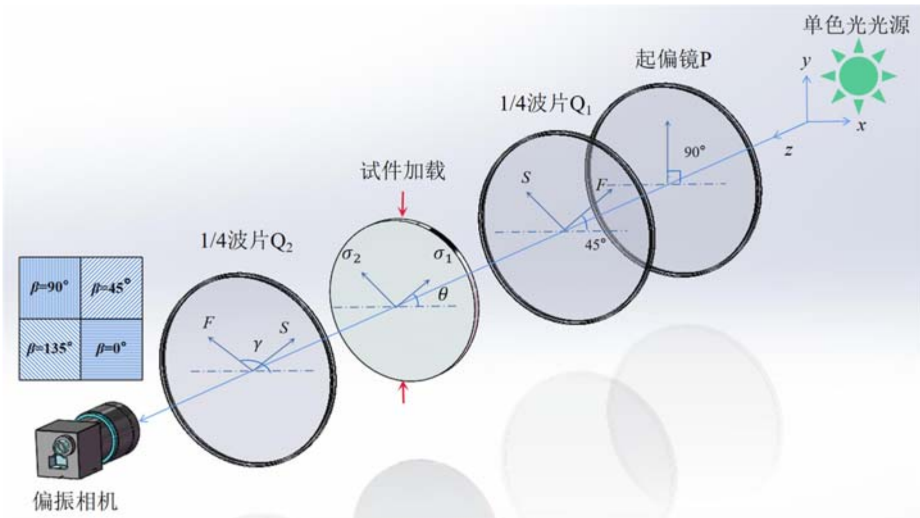

图 3 单色光六步相移法光路

Fig. 3 Optical path of the monochromatic light six-step phase-shift method

片 Q_1 的快轴与水平 x 轴的夹角固定为 45°；偏振相机在 1/4 波片 Q_2 的快轴与水平 x 轴夹角 γ 分别等于 135°和 180°时，采集 2 幅图像，与之前的白光四步相移法类似，从每幅图像中提取出 4 个方向的偏振图像，一共得到 8 幅偏振图像，对应光路的光强表达式见表 2。

表 2　单色光六步相移法记录的光强等式

Tab. 2　Light intensity equation recorded by the monochromatic light six-step phase-shift method

采图序号	γ	β	光强表达式 I_i
3	135°	0°	$I_9 = I_b + (I_a/2)(1 - \cos\delta)$
		45°	$I_{10} = I_b + (I_a/2)(1 - \sin\delta\cos 2\theta)$
		90°	$I_{11} = I_b + (I_a/2)(1 + \cos\delta)$
		135°	$I_{12} = I_b + (I_a/2)(1 + \sin\delta\cos 2\theta)$
4	180°	0°	$I_{13} = I_b + (I_a/2)(1 + \sin\delta\sin 2\theta)$
		45°	$I_{14} = I_b + (I_a/2)(1 - \cos\delta)$
		90°	$I_{15} = I_b + (I_a/2)(1 - \sin\delta\sin 2\theta)$
		135°	$I_{16} = I_b + (I_a/2)(1 + \cos\delta)$

利用偏振相机获得的相移图像，其光强表达式 I_i 见表 1 和表 2，在这些相移图像的基础上，由四步相移公式(1)和六步相移公式(2)即可求解出等倾线相位和等差线相位：

$$\theta = \frac{1}{4}\arctan\frac{I_3 - I_1}{I_5 - I_4},\ \sin(\delta/2) \neq 0 \tag{1}$$

$$\delta = \arctan\frac{(I_{15} - I_{13})\sin 2\theta_u + (I_{10} - I_{12})\cos 2\theta_u}{I_9 - I_{11}} \tag{2}$$

式中：θ_u 为在等倾线相位 θ 基础上解包裹得到的连续等倾线相位。由于使用白光作为四步相移法的光源，因此求解等倾线相位过程中可避免等差线相位 $\sin(\delta/2)=0$ 的情况出现，从而有效消除等倾线相位中的锯齿状噪声[8]。

2　自动相移光弹测量系统

基于偏振相机的十步相移方法，只需用偏振相机采集 4 幅图像即可完成相移图像的采集，相对于传统相机需要采集 10 幅图像来说，大大提升了测量效率。然而，在偏振相机采图过程中，依然需要人为转动镜片和切换光源，这对测量来说依旧是繁琐的。为解决这一问题，本文提出一种采用白光和滤波片组合作为光源，通过电控系统控制镜片转动和光源切换的自动相移光弹测量系统，以实现自动化的相移光弹测量。

自动相移光弹测量系统如图 4 所示，从图中可以看到，该测量系统由 1 个偏振相机、1 个白光光源、3 个电控转盘及待测试件组成。偏振相机用于采集图像，白光光源为 1 块白光 LED 发光板，3 个电控转盘可通过计算机控制，用于实现测量光路中的镜片转动和光源切换。3 个电控转盘具有相似的结构，都由 1 个电机和 1 个转盘构成，电机转轴与转盘平面垂直并与转盘中心固连，通过电机可驱动转盘转动，每个转盘上有 4 个相同的圆孔，编号为 1、2、3、4，它们与转盘中心等距，彼此间隔 90°。为实现所需的测量光路，在 3 个转盘的圆孔上安装了特定的镜片，如图 5 所示，这些镜片安装在圆孔上时，安装的角度要确保能够实现图 2 所示的白光四步相移法光路及图 3 所示的单色光六步相移法光路，具体实现方式见后续对采图步骤的介绍。

测量系统采集 4 幅图像的步骤为：首先，将 3 个转盘的孔 1 对齐，孔中心位于偏振相机的相机光轴上(图 4)，采集第 1 幅图像；然后，通过计算机控制 3 个转盘同步逆时针转动 90°，采集第 2 幅图像；最后，再控制 3 个转盘同步逆时针转动 2 次，每次转动 90°，分别采集第 3 幅和第 4 幅图像。表 3 给出了测

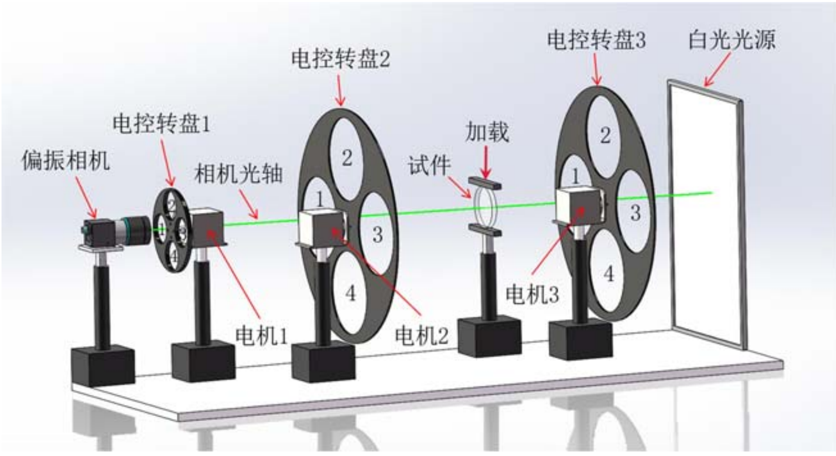

图 4 基于偏振相机的自动相移光弹测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the automatic phase-shift photoelastic measurement system

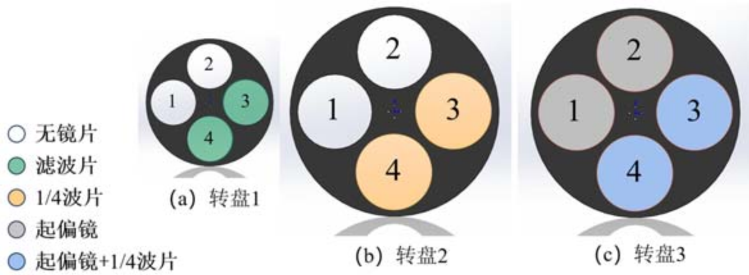

图 5 安装在 3 个转盘上的镜片:(a)转盘 1;(b)转盘 2;(c)转盘 3

Fig. 5 Lenses mounted on the three turntables: (a) turntable 1; (b) turntable 2; (c) turntable 3

量系统采集图像时对应的光路布置。以采集的第 1 幅图为例,采集该图时,3 个转盘的孔 1 都位于相机光轴上,转盘 1 和转盘 2 的孔 1 上都无镜片,转盘 3 的孔 1 上是起偏镜,该起偏镜是按照实现图 2 中 $\alpha=45°$的光路安装的,因此第 1 幅图采集时的光路是正确的。同理,还可以分析采集的第 3 幅图,采集该图时,3 个转盘的孔 3 都位于相机光轴上,转盘 1 的孔 3 上是滤波片,该滤波片只让特定波长的窄带光波通过,与白光光源组合使用,相当于实现了单色光源的效果,转盘 2 的孔 3 是 1/4 波片,转盘 3 的孔 3 是起偏镜和 1/4 波片,这些镜片都是按照实现图 3 中的光路安装的,因此该光路正是采集第 3 幅图像所需的光路。对照表 3、图 2 及图 3,可以确认测量系统正确采集了所需的 4 幅图像。

表 3 系统采集图像时对应的光路布置

Tab. 3 The optical path arrangement corresponding to image acquisition of the system

采图序号	圆孔编号	转盘 1	转盘 2	转盘 3	对应光路
1	1	无镜片	无镜片	起偏镜	图 2,$\alpha=45°$
2	2	无镜片	无镜片	起偏镜	图 2,$\alpha=90°$
3	3	滤波片	1/4 波片	起偏镜+1/4 波片	图 3,$\gamma=135°$
4	4	滤波片	1/4 波片	起偏镜+1/4 波片	图 3,$\gamma=180°$

图 6 给出了测量系统的实物照片。在该测量系统中,偏振相机型号为 MER2-502-79U3M POL,分辨率为 2 448×2 048,电机为可通过计算机串口控制的高精度步进电机,3 个转盘由厚度 4 mm 的亚克力板制成,转盘 1 直径为 100 mm,孔直径为 36 mm,转盘 2 和转盘 3 直径为 280 mm,孔直径为 100 mm,滤波片为中心波长为 550 nm、带宽为 10 nm 的窄带滤波片,白光光源为 1 块白光 LED 发光板。系统控制软件采用 Visual Studio 2022 编写,该软件可实现对偏振相机采图和电机转动的控制。采图测试表明,该系统可在 5 s 内完成相移图像的采集工作,相对于传统的测量系统,测量效率有了较大的提升。

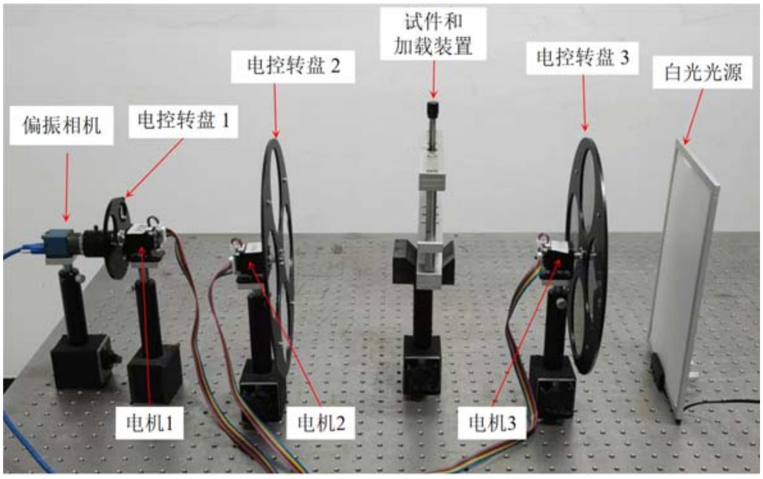

图 6　测量系统照片

Fig. 6　Photograph of the measurement system

3　实验结果分析

用本文系统对对径受压圆盘进行了测量。圆盘试件直径为 50 mm，厚度为 6 mm，载荷为 522 N，圆盘由光敏树脂材料 3D 打印制作。相对于传统的环氧树脂试件，光敏树脂材料 3D 打印的光弹试件更容易制作，且更适用于光弹性实验[29]。图 7 给出了本文系统采集到的对径受压圆盘相移图像，图 7(a)为白光四步相移的 4 幅相移图像，图 7(b)为单色光六步相移的 6 幅相移图像。由于采用了自动相移技术，本文系统仅用不到 5 s 的时间就完成了这些相移图像的采集，而传统的测量系统，即使在专业人员的操作下，也需要更长的时间才能完成这些图像的采集，且还会带来人工操作的不稳定性，因此，本文系统不但提升了测量效率而且增加了测量的稳定性。

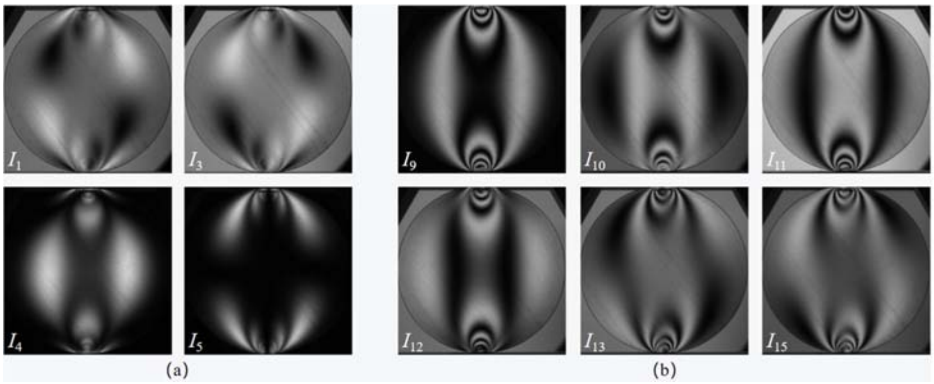

图 7　自动相移光弹系统采集的对径受压圆盘图像：(a)白光四步相移图像；(b)单色光六步相移图像

Fig. 7　Images of a diametric compression disk captured by the automatic phase-shift photoelastic system: (a) white light four-step phase-shift images; (b) monochromatic light six-step phase-shift images

在获得图 7 所示的相移图像基础上，根据四步相移公式可计算出等倾线相位 θ，如图 8(a)所示。需要说明的是，为避免对试件边缘的应力集中区域进行分析，本文对试件靠近边缘的部分进行了切割舍弃。图 8(a)所示的相位是包裹相位，利用等倾线相位的解包裹方法[13]对该包裹相位进行处理，可获得解包裹的等倾线相位 θ_u，如图 8(b)所示；根据对径受压圆盘的理论解和材料的应力条纹值参数，可以计算出等倾线相位的理论分布，如图 8(c)所示；图 8(d)给出了等倾线相位的实验值与理论值的差值；图 8(e)为根据六步相移公式计算得到的等差线相位 δ，该相位同样是包裹相位，对该包裹相位进行相位解包裹处理，得到连续的相位分布，如图 8(f)所示；图 8(g)为对径受压圆盘等差线相位的理论分布；图 8(h)为等差线相位的实验值与理论值的差值。从图 8(d)和图 8(h)可以看出，本文方法的测量结果与理论值吻合良好。为定量评估测量结果，本文计算了全场绝对平均误差 e：

$$e=\frac{\sum_{i\in\Omega}|X_i-x_i|}{\sum_{i\in\Omega}1} \tag{3}$$

式中:Ω 表示测量区域;X_i 和 x_i 分别为测量区域内某点的实验值和理论值。通过计算可得,圆盘等倾线相位的平均误差 e=0.056 rad,圆盘等差线相位的平均误差 e=0.157 rad,从而证实了本文方法的测量准确性。图 9 给出了圆盘上部 y/R=1/2(R 为圆盘半径,y 为以圆盘中心为原点的竖直向上坐标,F 为载荷水平线上,实验值和理论值的对比曲线。图 9(a)为等倾线相位实验值和理论值的对比曲线,图 9(b)为等差线相位实验值和理论值的对比曲线。从图 9(a)和图 9(b)可以看出,等倾线相位和等差线相位的实验值和理论值都相互吻合,进一步证实了本文系统测量的准确性。图 9(b)中等差线相位曲线的两边没有下降到 0,这是因为本文对试件靠近边缘的部分进行了切割舍弃,因此该曲线的两边还未达到圆盘的自由边界。

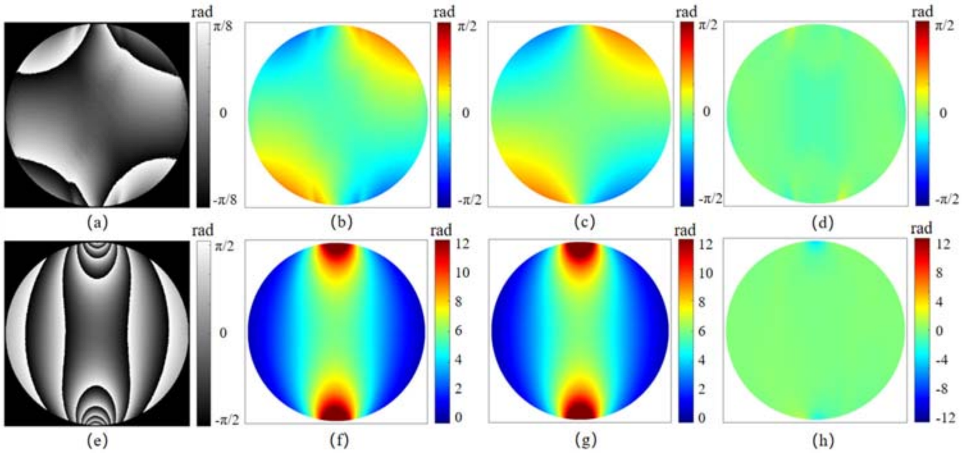

图 8 对径受压圆盘的实验结果和理论值:(a)包裹的等倾线相位;(b)解包裹的等倾线相位;(c)等倾线相位的理论值;(d)等倾线相位实验值与理论值的差值;(e)包裹的等差线相位;(f)解包裹的等差线相位;(g)等差线相位的理论值;(h)等差线相位实验值与理论值的差值

Fig. 8 The experimental results and theoretical values of the diametric compression disk: (a) wrapped isocline phase; (b) unwrapped isocline phase; (c) theoretical value of the isocline phase; (d) difference between the measured and the theoretical value of the isocline phase; (e) wrapped isochromatic phase; (f) unwrapped isochromatic phase; (g) theoretical value of the isochromatic phase; (h) difference between the measured and the theoretical value of the isochromatic phase

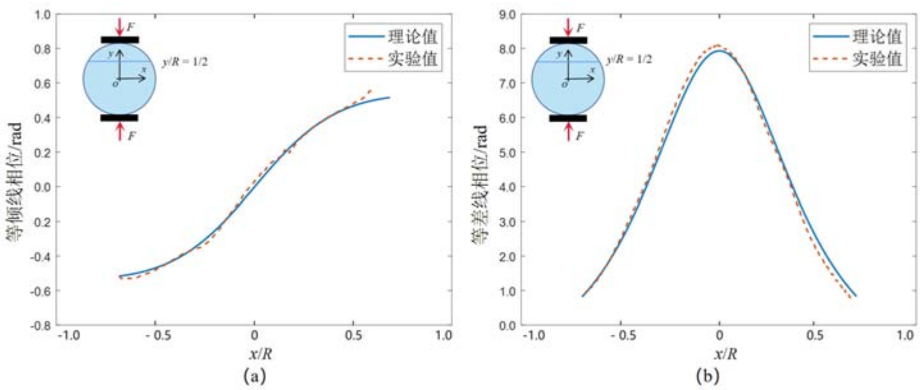

图 9 圆盘沿直线(y/R=1/2)的实验测量值与理论值对比:(a)等倾线相位对比;(b)等差线相位对比

Fig. 9 Comparison of experimental and theoretical values of disk along a straight line (y/R=1/2): (a) comparison of the isocline phase; (b) comparison of the isochromatic phase

为进一步验证本文系统测量的有效性和准确性,对光敏树脂 3D 打印的圆环试件开展了对径受压

实验。圆环外直径为 50 mm，内直径为 25 mm，厚度为 5 mm，载荷为 140 N。系统采集的相移图像如图 10所示，这些相移图像的采集耗时不到 5 s，说明系统具有很高的测量效率。采用与圆盘实验相同的处理过程对圆环实验进行处理，所得结果如图 11 所示。图 11(a)～(d)分别为圆环的等倾线的包裹相位、解包相位、理论值[30]、实验值与理论值的差值；图 11(e)～(h)分别为圆环的等差线包裹相位、解包相位、理论值、实验值与理论值差值。为评价系统的测量准确性，用式(3)计算了圆环等倾线相位和等差线相位的全场平均误差，结果显示，圆环等倾线相位的平均误差 e=0.050 rad，圆环等差线相位的平均误差 e=0.314 rad，该误差值较小，从而证实了本文方法的测量准确性。图 12 给出了圆环上部 $y/R=3/4$ 水平线上实验值和理论值的对比曲线，其中，图 12(a)为等倾线相位的实验值和理论值对比曲线，图 12(b)为等差线相位实验值和理论值的对比曲线。从图 12 中可以看出，等倾线相位的实验值和理论值吻合很好，等差线相位的实验值和理论值在峰值处略有差异，但整体上是相互吻合的，证实了本文系统测量的有效性和准确性。

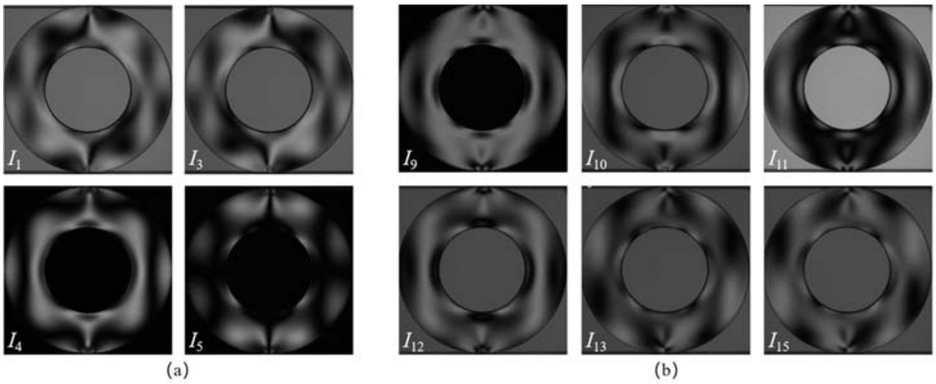

图 10　自动相移光弹系统采集的对径受压圆环图像：(a)白光四步相移图像；(b)单色光六步相移图像

Fig. 10　Images of a diametric compression ring captured by the automatic phase-shift photoelastic system: (a) white light four-step phase-shift images; (b) monochromatic light six-step phase-shift images

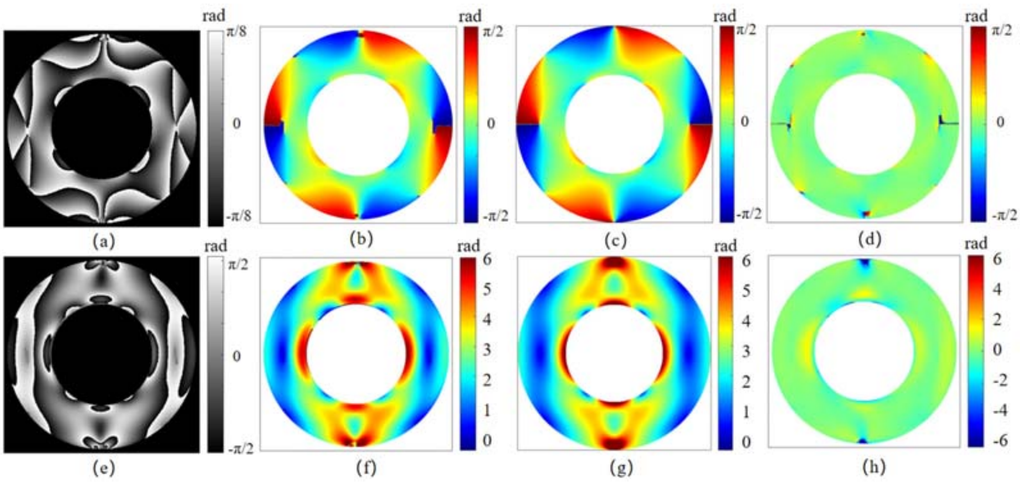

图 11　对径受压圆环的实验结果和理论值：(a)包裹的等倾线相位；(b)解包裹的等倾线相位；(c)等倾线相位的理论值；(d)等倾线相位实验值与理论值的差值；(e)包裹的等差线相位；(f)解包裹的等差线相位；(g)等差线相位的理论值；(h)等差线相位实验值与理论值的差值

Fig. 11　The experimental results and theoretical values of the diametric compression ring: (a) wrapped isocline phase; (b) unwrapped isocline phase; (c) theoretical value of the isocline phase; (d) difference between the measured and the theoretical value of the isocline phase; (e) wrapped isochromatic phase; (f) unwrapped isochromatic phase; (g) theoretical value of the isochromatic phase; (h) difference between the measured and the theoretical value of the isochromatic phase

本文使用偏振相机进行图像采集，偏振相机在采集图像的同时还起到了检偏镜的作用，因此，在安

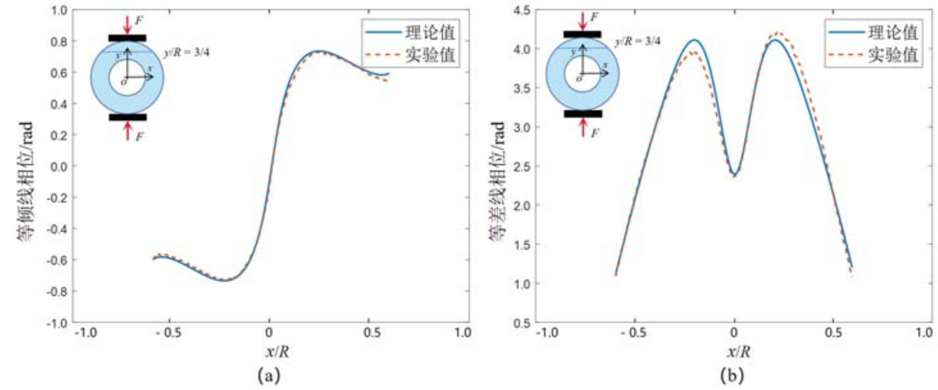

图 12 圆环沿直线(y/R=3/4)的实验测量与理论值对比:(a)等倾线相位对比;(b)等差线相位对比

Fig. 12 Comparison of experimental and theoretical values of disk along a straight line (y/R=3/4): (a)comparison of the isocline phase;(b)comparison of the isochromatic phase

装偏振相机时,如果偏振相机的 0°偏振方向与水平方向存在偏差,就会引起测量误差。该问题与传统光弹性实验装置中由于检偏镜的角度偏差而引起测量误差的情况相似,文献[20]中对此问题进行了详细讨论。本文利用与文献[20]类似的方法对偏振相机的角度偏差问题进行了分析,所得结果显示,当偏振相机的 0°偏振方向与水平方向偏差为±0.4°时,对圆盘测量问题而言,引起的等倾线相位平均误差 e=0.008 rad,引起的圆盘等差线相位平均误差 e=0.011 rad,这与实际测量得到的误差(圆盘等倾线相位平均误差 e=0.056 rad,圆盘等差线相位平均误差 e=0.157 rad)相比较小。实际上,通过机械设计和适当校准,可将偏振相机的角度偏差控制在较小的范围内,从而有效降低由此造成的误差影响。

4 结论

针对十步相移光弹测量方法操作复杂、测量效率低的问题,本文提出一种基于偏振相机的自动相移光弹系统。该系统通过偏振相机采集相移图像,采用白光和滤波片结合作为光源,并通过电控系统控制镜片的转动和光源的切换,实现了一种高效、自动的十步相移光弹性测量。本文系统采集所需的 10 幅相移图像耗时不到 5 s,相比于传统的测量系统,大大提高了测量效率。此外,本文系统的测量准确性也通过对圆盘和圆环的测量实验得到了验证。

参考文献:

[1] RAMESH K, SASIKUMAR S. Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135:106186.

[2] RAMESH K, SINGH R K. Comparative performance evaluation of various fringe thinning algorithms in photomechanics[J]. Journal of Electronic Imaging, 1995, 4(1):71-83.

[3] QUIROGA J A, GONZÁLEZ-CANO A. Separation of isoclinics and isochromatics from photoelastic data with a regularized phase-tracking technique[J]. Applied Optics, 2000, 39(17):2931-2940.

[4] RAMESH K, DESHMUKH S S. Three fringe photoelasticity—Use of colour image processing hardware to automate ordering of isochromatics[J]. Strain, 1996, 32(3):79-86.

[5] AJOVALASIT A, PETRUCCI G, SCAFIDI M. Review of RGB photoelasticity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 68:58-73.

[6] HECKER F W, MORCHE B. Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity[C]// Experimental Stress Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986: 535-542.

[7] PATTERSON E A, WANG Z F. Towards full field automated photoelastic analysis of complex components[J]. Strain, 1991, 27(2):49-53.

[8] PETRUCCI G. Full-field automatic evaluation of an isoclinic parameter in white light[J]. Experimental Mechanics, 1997, 37(4):420-426.

[9] LEI Z K, YUN D Z, YU W M. Whole-field determination of isoclinic parameter by five-step color phase shifting

and its error analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering，2003，40(3)：189-200.

[10] 雷振坤，云大真，亢一澜. 数字光弹性中五步彩色相移法及其应用[J]. 光学学报，2004，24(2)：162-167 (LEI Zhenkun，YUN Dazhen，KANG Yilan. Five-step color phase-shifting technique in digital photoelasticity and its applications[J]. Acta Optica Sinica，2004，24(2)：162-167 (in Chinese))

[11] 钟振威，贺玲凤. 改进的六步相移法确定等倾角与等差线相位[J]. 实验力学，2013，28(4)：524-528 (ZHONG Zhenwei，HE Lingfeng. On the determination of isoclinic angle and isochromatic line by a improved six-step phase shifting method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2013，28(4)：524-528 (in Chinese))

[12] 雷振坤，云大真，亢一澜，等. 数字光弹性法综述[J]. 实验力学，2004，19(4)：393-402 (LEI Zhenkun，YUN Dazhen，KANG Yilan，et al. A review of digital photoelasticity[J]. Journal of Experimental Mechanics，2004，19(4)：393-402 (in Chinese))

[13] RAMESH K，KASIMAYAN T，NEETHI SIMON B. Digital photoelasticity－A comprehensive review[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design，2011，46(4)：245-266.

[14] 李腾辉，姚瑞霞，于川，等. 基于六步相移法的集成化显微红外光弹系统的研制[J]. 实验力学，2019，34(1)：64-72 (LI Tenghui，YAO Ruixia，YU Chuan，et al. Development of an integrated micro-infrared photoelastic system based on six-step phase-shift method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2019，34(1)：64-72 (in Chinese))

[15] 富东慧，丁琦，王苗菁，等. 基于多步相移拟合的显微红外光弹系统研制[J]. 实验力学，2022，37(2)：143-151 (FU Donghui，DING Qi，WANG Miaojing，et al. Instrument development of micro-infrared photoelasticity based on multistep phase-shift fitting[J]. Journal of Experimental Mechanics，2022，37(2)：143-151 (in Chinese))

[16] RAMJI M，RAMESH K. Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity：Issues，implementation and application[J]. Optics and Lasers in Engineering，2008，46(3)：257-271.

[17] PATTERSON E A，WANG Z F. Simultaneous observation of phase-stepped images for automated photoelasticity [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design，1998，33(1)：1-15.

[18] ASUNDI A，TONG L，BOAY C G. Dynamic phase-shifting photoelasticity[J]. Applied Optics，2001，40(22)：3654-3658.

[19] 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.

[20] 邱川，陈念年，巫玲，等. 数字光弹性中六步混合相移技术[J]. 光学学报，2023，43(10)：1026001 (QIU Chuan，CHEN Niannian，WU Ling，et al. Six-step hybrid phase shift technique in digital photoelasticity[J]. Acta Optica Sinica，2023，43(10)：1026001 (in Chinese))

[21] ZHANG Z G，DONG F L，CHENG T，et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry[J]. Review of Scientific Instruments，2014，85(10)：105002.

[22] 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.

[23] REN Z Y，XIE H M，JU Y. Quantification of photoelastic fringe orders using polarized light camera and continuous loading[J]. Optics and Lasers in Engineering，2020，134：106263.

[24] XU Z K，ZHANG S Q，HAN Y S，et al. Full-field phase shifting and stress quantification using a polarization camera[J]. Measurement，2022，201：111727.

[25] ZHANG H J，JIA S H，WEN B，et al. Advancing instantaneous photoelastic method with color polarization camera[J]. Optics and Lasers in Engineering，2024，172：107868.

[26] GAO Y，WAN X J，XIE S P，et al. Error analysis and correction equations for a real-time phase-shifting method using circular polariscope-based photoelasticity[J]. Optik，2022，265：169528.

[27] SU F，WANG Z J. Error analysis and correction of a photoelastic method based on a pixelated polarization camera [J]. Optics and Lasers in Engineering，2023，161：107374.

[28] REBHAN D，ROSENBERGER M，NOTNI G. Principle investigations on polarization image sensors[C]. Jena：SPIE，2019.

[29] 万昌兵. 基于3D打印模型的粗糙断层剪切变形应力场的透明解析[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2022 (WAN Changbing. Transparentization and quantification of the stress field associated with shear deformation of rough faults using 3D printed models[D]. Beijing：China University of Mining and Technology(Beijing)，2022 (in

Chinese))

[30] TIMOSHENKO S. On the distribution of stresses in a circular ring compressed by two forces acting along a diameter[J]. Philosophical Magazine, 1922, 44:1014-1019.

Automatic phase-shift photoelastic measurement system based on polarization camera

WANG Can[1], LI Dewei[2], DING Zhongjun[2], PAN Bing[3], LI Kai[1]

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, Shandong, China; 3. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Phase-shift photoelastic method is a digital photoelastic measurement technique. Ten-step phase-shift method has been widely used in the phase-shift photoelastic method because of its high measurement accuracy. However, the ten-step phase shift method needs to collect 10 phase shift images in the measurement process, and needs to manually rotate the lens and switch the light source in the process of sampling, which is complicated and has low measurement efficiency. In order to solve this problem, an automatic phase shift photoelastic measurement system based on a polarization camera was proposed. The system applied the polarization camera to acquire images, used the combination of white light and filters as the light source, and controlled the lens rotation and light source switching through the electronic control system, so as to realize the automatic and efficient acquisition of phase shift images. Experimental measurements on a disk and a ring demonstrate that the proposed system can complete the acquisition of 10 phase-shift images within 5 s, which effectively improves the measurement efficiency compared with the traditional measurement system. In addition, the experimental results also prove the accuracy of the system measurement.

Keywords: photoelasticity; phase-shift method; polarization camera; automatic measurement system