

文章编号: 0253-2239(2004)02-162-6

数字光弹性中五步彩色相移法及其应用*

雷振坤¹ 云大真² 亢一澜¹

(1 天津大学机械学院力学系, 天津 300072)
(2 大连理工大学工程力学系, 大连 116024)

摘要: 把相移法与光学彩色信息图像处理技术相结合, 提出全场数字化确定主方向角的光弹性五步彩色相移法。其主要优点是采用最简单的白光平面偏振仪光学系统, 由数码照相机采集五幅等色线与等倾线相互耦合的彩色条纹图, 经计算机进行处理后, 就可以得到 $[0 \sim \pi/2]$ 范围内单纯连续的等倾角相图; 为了减少测量误差, 在相移法中引入背景光强参与运算。对实验中存在的三种主要误差因素进行了定量分析, 给出了具体的误差控制指标。用对径压缩圆盘问题的理论仿真模拟结果、基本实验和复杂平面及空间实际问题进行检验和对比, 表明本方法是正确可行的。

关键词: 光测力学; 图像处理; 数字光弹性; 等倾线; 相移法

中图分类号: O348; O438 文献标识码: A

Five-Step Color Phase-Shifting Technique in Digital Photoelasticity and Its Applications

Lei Zhenkun¹ Yun Dazhen² Kang Yilan¹

(1 Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072)
(2 Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technical, Dalian 116024)

(Received 28 October 2002)

Abstract: Combined color imaging with phase shifting, a technique named five-step color phase shifting (CPST) is presented to determine principal direction angle and the whole-field single isoclinic phase map in the range of $[0, \pi/2]$. A digital camera recorded five isoclinic color images coupled with isochromatics from a plane polariscope with five different settings, respectively. The unloaded light intensity image is introduced to operation. For knowing the accuracy of the CPST influenced by the different error sources, such as measuring intensities errors, orientation errors, and especially the initial stress errors, methods are given to analyze and estimate the influence of the different error sources on the final calculated isoclinic results. Experiments have been carried out with the simulation of a circular disk under diametral compression and some actual applications. This technique utilizes white light, which avoids undefined isoclinics near the locations where the isochromatics exist, and will have active effect on experimental stress analysis and structural strength design.

Key words: photomechanics; image processing; digital photoelasticity; isoclinics; phase-shifting technique (PST)

1 引 言

如何从等色线与等倾线相互耦合的条纹图中提取单纯的等倾线, 迄今仍是学者们感兴趣的难题之

一, 它是影响光弹性应力分析精度的关键。由于计算机和图像处理技术的快速发展使得这一研究取得了许多进展^[1]。成果主要有基于文献[2]相移法(PST)发展的单色光相移法^[3~9]、白光相移法^[10]和颜色分割法^[11]。文献[3~9]在解决等色线自动采集方面比较好, 而在提取单纯等倾线方面尚存在消除等色线不彻底、容易受到实验装置以及操作等因素的影响。文献

* 国家自然科学基金(10232030)资助课题。

E-mail: leizk@163.com

收稿日期: 2002-10-28

[11]则另辟蹊径,采用色彩分割的方法可获取单独某一等倾线,但在1级等色线附近,条纹分叉问题还有待进一步解决。此外,文献[12~14]对相移法误差问题进行了探讨。基于彩色图像处理技术和以前的工作,本文提出确定全场主方向角的光弹性五色彩色相移法(CPST),通过定量误差分析和实际应用,表明用本方法获取单纯等倾线是正确可行的。

2 基本原理

将应力模型置于图1所示的一般平面偏振光场中,用琼斯矩阵可以推导出单色光通过分析镜后的一般光强表达式为

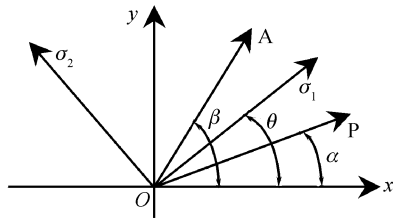


Fig. 1 A plane polariscope in which the polarizer and the analyzer are kept at arbitrary angles of α and β , respectively

$$I = I_b + I_p [\cos^2(\beta - \alpha) \cos^2(\phi/2) + \cos^2(\beta + \alpha - 2\theta) \sin^2(\phi/2)], \quad (1)$$

式中 I_p 为从起偏镜出射光光强, I_b 为背景光强, ϕ 为相位差。分别取 α, β 步长为 $\pi/4$, 若通过分析镜 A 后的光强等式用 $I_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ 表示, 则有模型任一点主方向在 $\sin^2(\phi/2) \neq 0$ 时为

$$\theta = 0.25 \arctan[(I_4 - I_2)/(I_5 - I_1)], \quad (2)$$

上式为单色光五色相移法的基本表达式^[15], 可得到 $[0, \pi/2]$ 范围内的主方向角。

从(2)式可见, 使用单色光的最大缺陷是在等色线条纹中心上, 主方向角没有值。结合光学彩色信息图像处理技术, 改用白光入射的平面偏振光场, 由数码相机采集彩色条纹图像, 图像中每一种颜色由红绿蓝(RGB)三个基本色组成, 因为白光波谱中不同波长的等色线在条纹中心的各点上, 其光强为所有白光波谱波长在该点上的光强之和。这样就克服了采用单色光的缺陷, 显示了使用白光的优越性。基本原理是用符号 $I_{j,i}$ 表示在不同设置下 $j (j = 1, \dots, 6)$ 从滤色镜 $i (i = R, G, B)$ 出射的光强, 则有

$$\left. \begin{aligned} I_j &= I_{j,R} + I_{j,G} + I_{j,B} + I_b, \\ I_b &= I_{b,R} + I_{b,G} + I_{b,B}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以(3)式代替(2)式中的各项, 可以推出白光入射的五步彩色相移法的基本公式为

$$\theta = 0.25 \arctan \left[\frac{(I_{4R} + I_{4G} + I_{4B}) - (I_{2R} + I_{2G} + I_{2B})}{(I_{5R} + I_{5G} + I_{5B}) - (I_{1R} + I_{1G} + I_{1B})} \right], \quad (4)$$

3 模拟验证和与已有方法比较

采用有理论精确解的对径压缩圆盘问题进行仿真模拟, 以可视化相图的形式给出计算结果(图2), 可以直观地看出将 Patterson 和 Wang 法^[5]、单色光五色相移法^[15]和白光五色彩色相移法的优缺点。对径压力为 313.6 N, 圆盘直径为 50 mm, 厚度为 4.8 mm, 材料条纹值为 7.6222 N/(mm·l)。在 $[0, \pi/2]$ 范围内的主方向角

用 256 级灰度显示, 主方向角为 0° 时对应的灰度值为 0, 90° 时对应的灰度值为 255。灰度值越大, 图像越亮, 表示主方向角越大; 同一灰度值的像素点具有相同的主方向角, 即等倾角。从图 2 可以看出, 五色彩色相移法所得到的等倾角相图[图 2(c)]与理论等倾角相图[图 2(d)]最接近。其它两种方法由于受其基本原理的制约, 在等色线为半数级或整数级的条纹上, 等倾角相图明显均出现不连续锯齿形的缺陷。

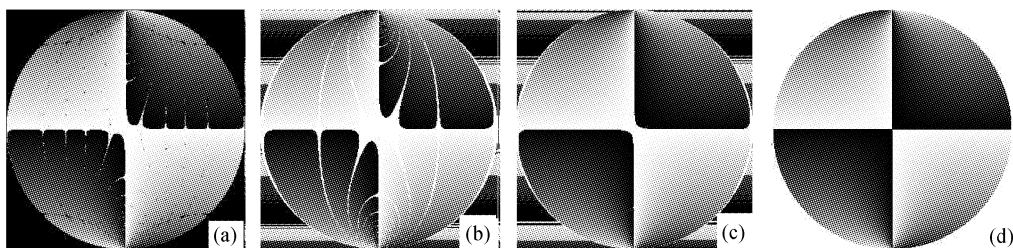


Fig. 2 (a)~(c) phase map of isoclinics calculated by Patterson and Wang's PST. Five-step PST and CPST respectively, (d) theoretical phase map of isoclinics

4 定量误差分析

4.1 光强变化的影响

已有的相移法大多是采用数字图像处理技术直接利用图像的灰度进行分析的,因此测量结果的精度很大程度上受制于数字图像处理系统硬件的质量、特征参量以及环境噪声等因素。2000年 Remesh^[1] 提出一个衡量光强变化的影响因子,使模型各点的主方向角误差随它变化,并用它来分析 Patterson 和 Wang 相移法受光强变化影响的程度,它的不足之处是主方向角误差的零点不随影响因子变化而变化。本文提出用双影响因子来衡量光强变化对主方向角的影响,克服了上述的不足。基本原理是将主方向角 θ 看作成光强误差的函数,从(2)式可得

$$d\theta = \sum_{j=1}^5 \frac{\partial \theta}{\partial I_j} dI_j, \quad (5)$$

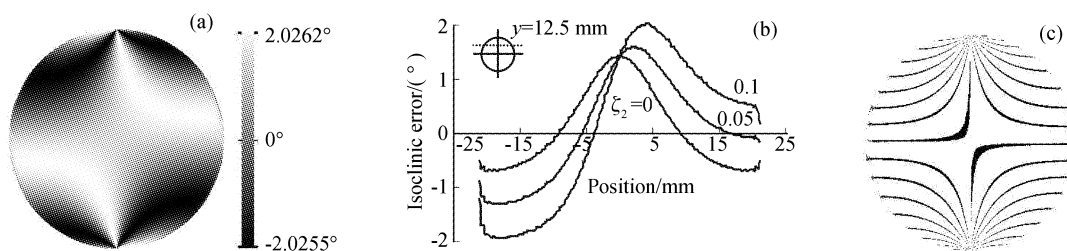


Fig. 3 (a) Error phase map of isoclinics when the error percent in measuring intensities is $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.1$, (b) error curves of principal directions along the horizontal line ($y = 12.5$ mm) across the middle point of a half-upper disk under diametral compression when $\zeta_1 = 0.1$ and $\zeta_2 = 0, 0.05$ and 0.1 respectively, (c) isoclinics in steps of 10° when $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.1$

4.2 方位角误差的影响

本方法所用的平面偏振仪光学系统只有起偏镜和分析镜存在方位角误差,设分别为 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$,它们一般是在仪器安装或实验过程中造成的。这将导致

其中 $d\theta$ 为主方向角的误差, dI_j 是五种设置下的光强误差。对(2)式进行偏微分后,代入(5)式有

$$d\theta = \frac{I_p}{4} \left[\frac{(I_5 - I_1)\zeta_1 + (I_4 - I_2)\zeta_2}{(I_4 - I_2)^2 + (I_5 - I_1)^2} \right], \quad (6)$$

其中 ζ_1 和 ζ_2 为光强误差的双影响因子,它们是 I_p 的百分比,且有

$$dI_4 - dI_2 = \zeta_1 I_p, \quad dI_5 - dI_1 = \zeta_2 I_p. \quad (7)$$

由(6)式和图3可见,主方向角误差 $d\theta$ 值不仅随双影响因子 ζ_1 和 ζ_2 的变化而变化,而且其零点也随之发生移动,最大误差不超过 $\pm 2^\circ$ 。在设计和制造偏振仪时,仪器的光源一定要保持均匀稳定,图像采集设备精度要好,使实验过程中 $\zeta_1 \approx \zeta_2 \approx 0$,一般应控制 ζ_1 和 ζ_2 小于1%,才能保证测量结果的精度。若光源的光强随机波动,可以通过在不同时刻拍摄多幅图像再平均化,来减轻它的影响。

从偏振仪输出的真实光强方程与理论产生误差,影响主方向角的计算结果。我们给出了评估方位角误差影响的公式:

$$I^* = I_p [\cos(\beta - \alpha) - (\Delta\beta - \Delta\alpha)\sin(\beta - \alpha)]^2 \cos^2(\phi/2) + I_p [\cos(\beta + \alpha - 2\theta) - (\Delta\beta + \Delta\alpha)\sin(\beta + \alpha - 2\theta)]^2 \sin^2(\phi/2), \quad (8)$$

其中 I^* 为受方位角误差影响的光强,其它符号与图1和(1)式中的相同。

采用对径压缩圆盘问题进行仿真模拟,直观地给出了 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 分别为 $\pm 2^\circ$ 时的等倾角相图 [图4(a)~图4(d)]^[16],与之对应的以 10° 步长变化的等倾线图,如图4(e)~图4(h)所示。当 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 超过

$\pm 2^\circ$ 以后,对主方向角的影响更加严重,实验已无意义。由分析可知,各偏振镜的方位角误差应限制在 0.5° 以内。起偏镜和分析镜的偏振轴方向要严格精确校准,仪器的刻度盘应选用高精度的刻度系统来减少方位角误差的影响,此外还要注意模型或切片安装时必须准确,以免间接使偏振镜产生方位角误差。

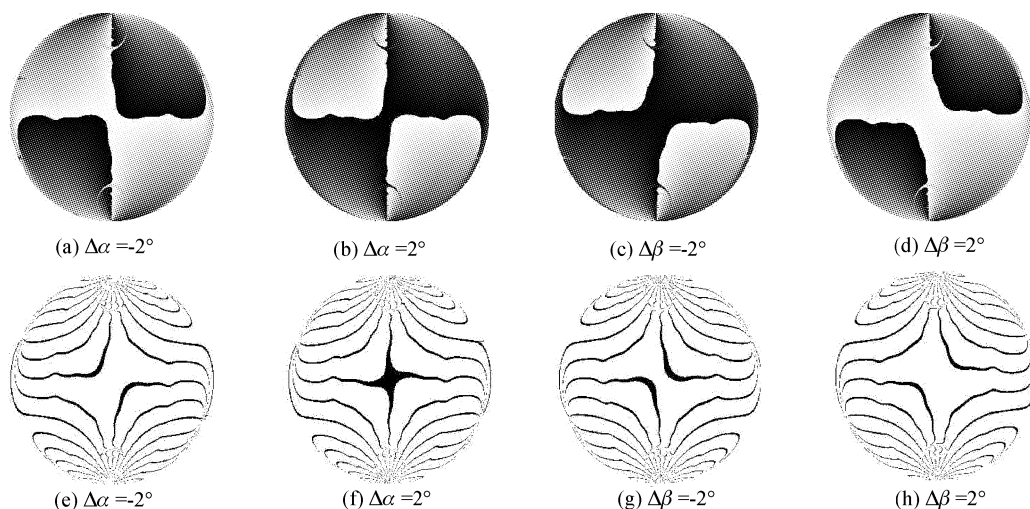


Fig. 4 (a)~(d) Phase maps of isoclinics when $\Delta\alpha$ ($\Delta\beta$) is $\pm 2^\circ$ respectively, (e)~(h) isoclinics in steps of 10° corresponding to (a)~(d) respectively

4.3 模型初应力的影响

作为研究对象的光弹性模型,由于制造、加工和实验时间的延误等因素的影响,难免会产生边缘效应和与之相平衡的内部初应力。研究初应力对光弹性相移法确定主方向角的影响是很有意义的,但尚未有文献报道。根据应力分析理论,作者推导出评估初应力影响的式子为

$$K = \epsilon \sin 2\theta_0, \quad (9)$$

其中 $K = \sin 2\theta^* - \sin 2\theta$, 称为 K 因子; $\epsilon = \phi_0/\phi^*$ 为初应力相位差百分比, 简称百分比 ϵ 。如果 K 因子和百分比 ϵ 知道, 它们还必须满足下式:

$$\theta_0 = 0.5 \arcsin(K/\epsilon) = 0.5 \arcsin K_\epsilon,$$

$$K_\epsilon \in [-1, 1], \quad (10)$$

其中 $K_\epsilon = K/\epsilon$ 。特殊地, 当 $|K_\epsilon| = 1$ 时, 有 $|\theta_0| = 45^\circ$, 此时初应力为纯剪切状态。

文献[17]通过对具有初应力的光弹性悬臂梁模型施加不同载荷的实验, 结合五色彩色相移法进行定量误差分析, 给出百分比 ϵ 和 K 因子的合适范围为 $[-0.01, 0.01]$ 。我们还用对径压缩圆盘在 $\epsilon \in [0, 0.2]$ 和 $K \in [-0.2, 0.2]$ 范围内计算了 60 个仿真模拟的相图, 表明上述 ϵ 和 K 的控制范围是正确的, 必须严格遵守。这里仅给出其中图 5 所示的结果, 由此可见当 ϵ 和 K 的取值不同, 其影响程度是各不相同的。

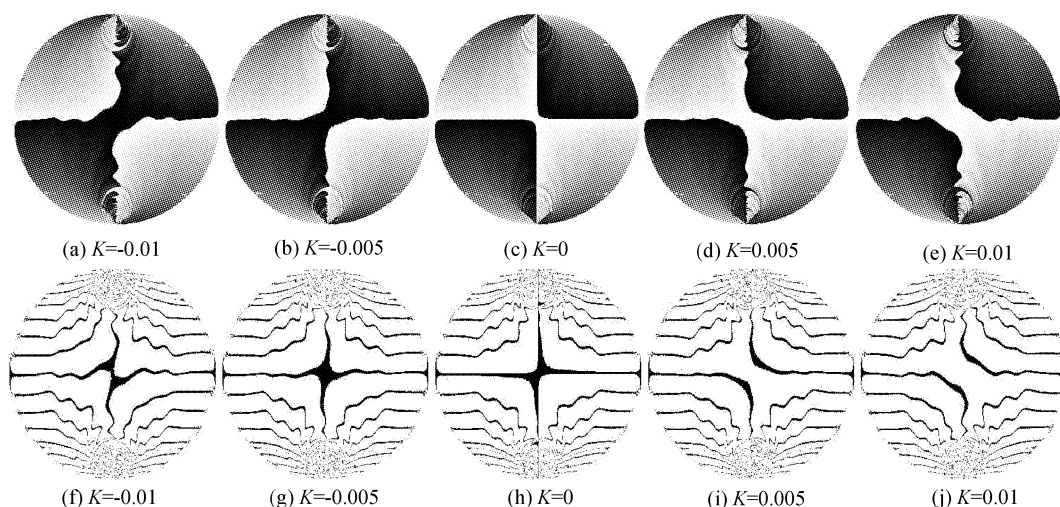
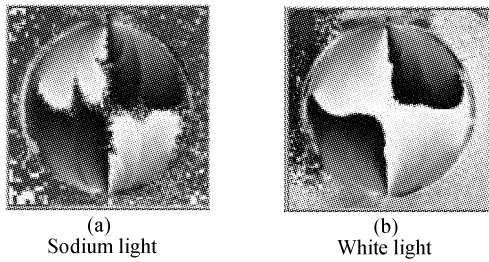


Fig. 5 (a)~(e) Phase maps of isoclinics when $\epsilon=0.05$ and $K=-0.001, -0.005, 0, 0.005$ and 0.01 respectively, (f)~(j) isoclinics in steps of 10° corresponding to (a)~(e) respectively

5 实际应用

5.1 基本实验应用

将对径压缩的聚碳酸酯圆盘模型置于图 1 的偏振光场中,用彩色数码相机分别摄取五幅图像 I_1 、 I_2 、 I_4 、 I_5 和对应于 I_1 的无载背景光强图 I_{01} ,经过平滑和滤波去噪声后,用 VC++ 6.0 编制的程序进行处理,



便可获得主方向角的相图。白光五步彩色相移法的结果[图 6(b)]明显要比单色光的好[图 6(a)]。沿圆盘上半部中点水平线上($y = 12.5 \text{ mm}$),结合边界条件将主方向角用多项式拟合成曲线[图 6(c)],可见由于实验模型存在一定的初应力,所以必须调整载荷的大小,才能使实验的结果与理论精确解接近。

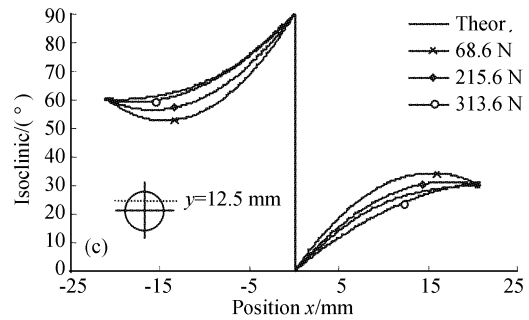


Fig. 6 Isoclinic phase maps of a circular disk under diametral compression by PST represented in 256 grays by monochromatic light (a) and white light (b), and (c) comparison of the theory with the calculated values by CPST along a horizontal line $y = 12.5 \text{ mm}$ across upper half of a disk when load is 68.6 N , 215.6 N and 313.6 N , respectively

5.2 实际应用

为了考察本方法的可行性和优点,将 Patterson 和 Wang 法^[5]、单色光五步相移法^[15]以及本方法分别应用到具有复杂平面和空间结构的光弹性模型

中,它们是对顶压缩的方块、耳片孔中受销钉拉伸作用和三维梯形大头坝受水压作用三个实际问题,由三种方法得出得等倾角相图见表 1 所示。

Table 1 Comparison of isoclinic angle phase map calculated by different methods for three models

	Patterson and wang's method	Five-step monochromatic PST	Five-step color PST
Diamond under diametral compression			
Sling hole pulled by a pin			
Trapeziform 3-D dam under water press			

比较表 1 中的主方向角相图,可见本方法的结果最佳。从未经过任何去噪和滤波处理的原始数据计算得到的任一截面上主方向角分布曲线(因篇幅所限,未给出),也表明本方法的结果离散度最小,而且比较合理。

结束语 本文从基本原理、定量误差分析、对径压缩圆盘问题理论模拟的检验、复杂的二维平面和三维空间实际问题的应用对比,全面阐述了确定全场主方向角的光弹性五色彩色相移法是正确的,且优于现有的同类方法。

由于 0 级等色线为永久性黑点(线),导致本方法在这些区域得到的等倾角相图发生消光,这可通过已知的边界条件来弥补。广义地说,光弹性材料和模型是一种光学相位体,很容易受到力学、物理、化学等参量和形貌等因素的影响。所以,在采用相移法确定光弹性参量过程中,要尽量减少上述各种参量和因素的影响,以免引入与实验仪器系统及测试过程无关的误差,这是一个很重要的问题,但往往被人忽视。

参 考 文 献

- 1 Remesh K. *Digital Photoelasticity—Advanced Techniques and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 174~175
- 2 Heker F W, Morche BC. Computer-aided measurement of relative retardation in plane photoelasticity. In: Wieringa H. ed. *Experimental Stress Analysis*, 1986, 535~542
- 3 Yao J Y. Extracting isoclinics using image processing techniques. *Exp. Mech.*, 1987, **11**(10):30~31
- 4 Maeatari S, Takashi M, Toyoda Y *et al.*. A single-valued representative function for determination of principal stress direction in photoelastic analysis. *Proc. 9th Intl. conf. On Exp. Mech.*, 1990, **5**:2069~2078
- 5 Patterson E A, Wang Z F. Towards full field automated photoelastic analysis of complex components. *Strain.*, 1991, **27**(2):49~56
- 6 Sarma A V S S R, Pillai S A, Subramanian G *et al.*. Computerized image processing for whole field determination for isoclinics and isochromatics. *Exp. Mech.*, 1992, **32**(1):24~29
- 7 Chen T Y, Lin C H. Whole-field digital measurement of principal stress directions in photoelasticity. *Opt. Lasers Engng.*, 1998, **30**(6):527~537
- 8 Wang Z F, Patterson E A. Use of phase-stepping with demodulation and fuzzy sets for birefringence measurement. *Opt. Lasers Engng.*, 1995, **22**(2):91~104
- 9 Kihara T. Automatic whole-field measurement of principal stress directions using three wavelengths. *Proc. 10th Intl. Conf. Exp. Mech.*, 1994, **1**, Lisbon, 95~99
- 10 Petrucci G. Full-field automatic evaluation of an isoclinic parameter in white light. *Exp. Mech.*, 1997, **37**(4):420~426
- 11 Tang Chen, Yu Wanming, Yun Dazhen. Color image separation method for obtaining pure isoclinic pattern. *J. Dalian Univ. Technol.* (大连理工大学学报), 1999, **39**(4): 494~497 (in Chinese)
- 12 Juan Antonio Quiroga, Agustin Gonzalez-Gano. Method of error analysis for phase-measuring algorithms applied to photoelasticity. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(20):4488~4495
- 13 Ji W, Patterson E A. Simulation of error in automated photoelasticity. *Exp. Mech.*, 1998, **39**(2):132~139
- 14 Tamrakar D K, Ramesh K. Simulation of error in digital photoelasticity by Jones Calculus. *Strain*, 2001, **37**(3): 105~112
- 15 Lei Zhenkun, Yun Dazhen. Whole-field determination of isoclinic parameter by five-step color phase shifting technique. *Opt. Technol.* (光学技术), 2002, **28**(2):143~144. (in Chinese)
- 16 Lei Zhenkun, Yun Dazhen, Yu Wanming. The influence of intensity and orientation errors on photoelastic five-step color phase shifting. *Opt. Technol.* (光学技术), 2002, **28**(4):313~316 (in Chinese)
- 17 Lei Zhenkun, Yun Dazhen, Kang Yilan *et al.*. Photoelastic five-step phase shifting to estimate the influence of initial stresses on isoclinic. *Exp. Mech.* (实验力学), 2002, **17**(3):267~273 (in Chinese)