

文章编号: 0258-7025(2007)08-1120-05

会聚光横向剪切移相干涉

孔梅梅, 高志山*, 陈磊

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了检测长光程情况或多组分光学镜头逐片装校中的波面, 提出一种以会聚光波直接作为干涉测试光源的会聚光移相剪切干涉方法, 阐述了基于迈克耳孙干涉仪原理的会聚光横向剪切干涉光路, 建立了会聚光横向剪切波面的数学表达式, 并与一般横向剪切干涉相比较, 分析了剪切量和波面偏移量的特征, 且引入移相干涉技术求取剪切波面。结果表明, 会聚光横向剪切移相干涉测试, 能够实时测试会聚光的波面质量, 峰谷值(PV)的重复性为 0.022λ , 均方根(RMS)值的重复性为 0.014λ , 并与 Zygo 干涉仪的测量结果进行了对比, 验证会聚光剪切移相干涉的可行性。

关键词 测量; 剪切干涉; 移相; 会聚光

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

Phase-Shifting Lateral Shearing Interferometry of Convergent Beam

KONG Mei-mei, GAO Zhi-shan, CHEN Lei

(School of Electronic Engineering & Optoelectronic Techniques,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract For detecting wavefronts from the system with long optical path or multi-component lens with one by one aligning, the phase-shifting lateral shearing interferometry of convergent beam with the convergent beam as light source for interferometry is proposed, which is based on Michelson interferometer. The mathematical expression of the laterally shifted wavefront of convergent beam is established and compared with that of general lateral shearing interferometers. The shearing and wavefronts displacement are analyzed, and the phase-shifting interferometry is adopted to obtain the sheared wavefronts. The results show that the lateral shearing phase-shifting interferometry of convergent beam can measure the real-time wavefronts of convergent beam with repetitions of peak-valley (PV) value and root-mean-square (RMS) of 0.022λ and 0.014λ respectively. The experimental results are compared with that by Zygo interferometer, which proves the validity of the proposed technique.

Key words measurement; shearing interferometry; phase-shifting; convergent beam

1 引言

会聚光能产生光焦度, 是光学系统中普遍存在的波面形式, 远紫外波段的高分辨光刻系统^[1]、离焦三反光学系统中会多次出现会聚光波, 在系统装校中希望对会聚光实现在线检测。过去对会聚光的检测, 一般使用带有参考面的比较干涉测量法, 将产生

会聚光的光学器件放进现有干涉仪中, 通过测量透射光波或反射光波获得结果。但在许多应用场合, 如长焦距光学系统、长曲率半径零件的波面检测, 若使用带有参考面的比较干涉测试方法, 由于干涉腔太长易受气流扰动, 使测试无法进行, 若加入波面转换系统使会聚光变成准直光束, 又会引入附加测试

收稿日期: 2006-11-21; **收到修改稿日期:** 2007-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60678048)资助项目。

作者简介: 孔梅梅(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事光学设计与光学测试智能化仪器研究。

E-mail: kongmm2004@163.com

导师简介: 陈磊(1964—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 研究方向为光学计量测试与光电智能化仪器。

E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn

误差^[2];如产生会聚光的光学器件尺寸大,测量时将不易移动或者另需大口径光学标准器具。所以,希望以会聚光波直接作为干涉测量光源,实现在线测量。早在 20 世纪 80 年代就开始研究会聚光横向剪切干涉^[3,4],后由于剪切干涉波面复原模型复杂,使之应用受到限制,但剪切干涉方法具有抗环境扰动(如气流、振动等)的优点。近年,Ho-Jae Lee 等^[5]采用改进的龙基(Ronchi)光栅作为剪切器件检测小口径非球面的面型;Tae-Joon Hwang 等^[6]在光栅剪切基础上引入移相法,用于检测长光程凹反射镜的面型;Kiyofumi Matsuda 等^[7]也设想旋转迈克耳孙干涉仪中分束镜产生剪切的会聚光剪切方法,用于测量大口径会聚光的可能性。

在会聚光剪切干涉中引入移相干涉方法处理剪切干涉图,并据专用软件复原原始波面,可使剪切干涉测试过程快速和自动化。因此本文将被测会聚光直接作为迈克耳孙干涉仪的光源,通过压电陶瓷(PZT)推动其中一个反射镜,研究基于移相技术的会聚光剪切干涉原理、基本数学模型、波面复原方法,通过实验对比测量了会聚光波面质量。

2 原 理

平行剪切板类型的平面剪切元件,无法得到反映会聚光波面质量的剪切干涉条纹,同时又不利于实现移相。对会聚光波面质量的剪切测量,一般采用迈克耳孙干涉仪形式,图 1 就是基于迈克耳孙干涉仪原理的会聚光波面剪切测量的干涉原理图。

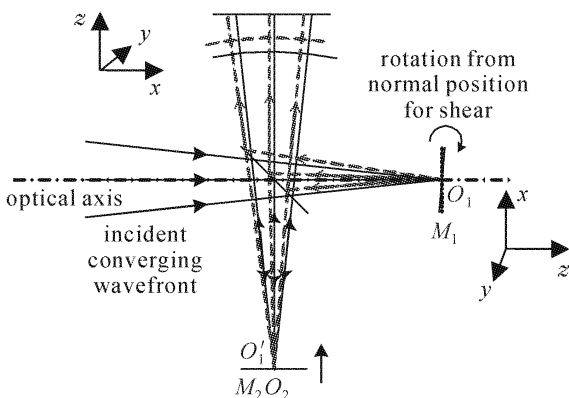


图 1 会聚光横向剪切干涉的原理图

Fig. 1 Principle of lateral shearing interferometer of convergent beam

图 1 中,光轴方向为 z 轴, x 轴位于纸面内垂直于 z 轴, y 轴垂直于纸面(x, y, z 轴满足右手坐标系)。当反射镜 M_1 绕 O_1 点在纸面上旋转一定角度

时,即在 x 方向产生如图 1 所示的横向剪切。该横向剪切应为横向旋转剪切,非横向平行剪切^[3],因为反射镜 M_1 的旋转中心为 O_1 , O_1 等效于 O'_1 , O'_1 和 O_2 重合,所以原始波面的光轴与错位波面的光轴相交于点 O_2 (O'_1),即反射镜 M_1 的旋转作用是使原始波面与错位波面的光轴旋转,不是将会聚光波面进行简单的横向错位偏移。当反射镜的旋转中心与波面的曲率中心重合(O_1),且理想球面波入射时,干涉场将是一片亮(暗)场,不会出现干涉图。

2.1 剪切量的计算

原始波面与错位波面的示意图见图 2,设原始波面为 W_1 和错位波面为 W_2 。反射镜 M_1 旋转角度为 θ 时,原始波面的光轴与错位波面的光轴交于 O_2 点,剪切角 $\phi = 2\theta$ 。

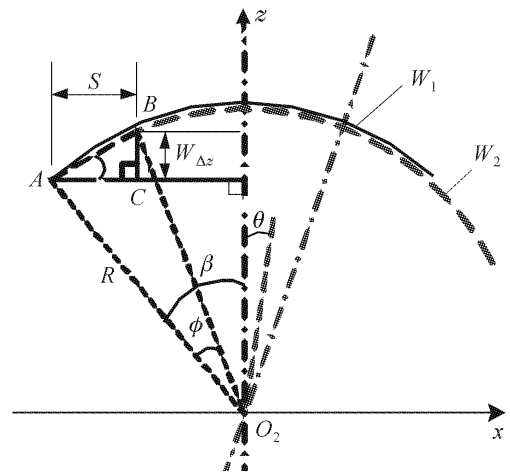


图 2 会聚光横向剪切的原始波面与错位波面示意图

Fig. 2 Sketch map of the original wavefront and the sheared wavefront of the laterally sheared convergent beam

由图 2 可知,横向旋转剪切中,错位波面相对于原始波面既有 x 方向的平移量,又有光轴方向(z 方向)的平移量。设波面在 x 方向上的剪切量 $S = AC$, z 方向上的偏移量 $W_{\Delta z} = BC$ 。在 $\triangle ABO_2$ 和 $\triangle ABC$ 中, $\angle BAC = \beta - \theta$,由三角关系分别计算得到剪切量 S 和偏移量 $W_{\Delta z}$ 的表达式

$$S = 2R\sin\theta\cos(\beta - \theta), \quad (1)$$

$$W_{\Delta z} = 2R\sin\theta\sin(\beta - \theta), \quad (2)$$

式中 R 为波面的曲率半径; β 为原始波面上某一点与 O_2 点连线对光轴 O_2z 的张角,如该点的 y 坐标不为零,即位于空间位置上,则 β 为前述张角在 xO_2z 平面上的投影角。图 2 显示了最大 β 角的情况,角 β 随着波面上选取点的不同而不同,所以波面的剪切量是一个变量。例如,被检会聚光波的光瞳直径为

25 mm, 曲率半径为 110 mm, 假设旋转角度 $\theta = 1^\circ$, 即 $\phi = 2^\circ$ 时, 得到剪切量 S 与 β 角的关系曲线图, 如图 3 所示。

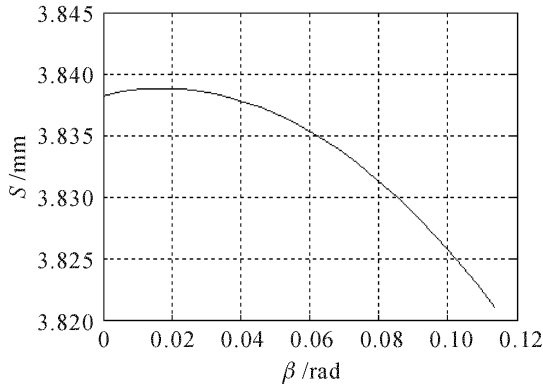


图 3 剪切量 S 与 β 角的关系曲线图

Fig. 3 Relation of shearing S and angle β

通常在实际测量中, 为了使模型简化和保证足够的被测区域, 转动的角度 θ 很小 ($\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$), 即 ϕ 很小, 则(1)和(2)式可化简为

$$S = R\phi \cos\beta, \quad (3)$$

$$W_{\Delta z} = R\phi \sin\beta, \quad (4)$$

可见, 与一般的平行光横向剪切干涉相比, 会聚光横向剪切干涉中, 不仅在 x 方向上存在剪切量 S , 还同时在 z 方向——波面的光轴方向上也引入了偏移量 $W_{\Delta z}$ 。另一方面, 此时的剪切量除了和剪切角 ϕ 有关以外, 还与 β 角, 即波面的坐标位置有关, 不再是一个定值。

2.2 会聚光横向剪切波差表达式

设原始波面为

$$W_1 = W(x, y), \quad (5)$$

当 ϕ 很小时, 由(3), (4)式得错位波面

$$W_2 = W(x + S, y) + W_{\Delta z} = W(x + R\phi \cos\beta, y) + R\phi \sin\beta, \quad (6)$$

则图 1 中反射镜 M_1 在纸面上旋转 θ 时, x 方向上剪切干涉图的波差表达式为

$$\Delta W_x = W_1 - W_2 =$$

$$W(x, y) - W(x + R\phi \cos\beta, y) - R\phi \sin\beta, \quad (7)$$

即会聚光横向剪切干涉 x 方向上的波差表达式。与一般的平行光横向剪切干涉的波差表达式 $\Delta W_x = W(x, y) - W(x + S, y)$ 相比, 会聚光横向剪切干涉中, 除了在剪切方向上引入了剪切量, 还在波面的光轴方向上引入了波面的偏移量, 而且, 它们都随剪切方向对应的波面坐标值而变化。

2.3 反射镜 M_1 旋转点偏离 O_2 的影响

会聚光产生横向剪切干涉是通过反射镜 M_1 旋

转来实现的, 如果反射镜旋转中心偏离 O_2 , 存在如图 4 所示的偏移量 δ_x , 其中, O_p 为反射镜偏移的旋转中心, 则错位波面

$$\begin{aligned} W_2 &= W(x + S - \delta_{\Delta x}, y) + W_{\Delta z} + \delta_{\Delta z} = \\ &W(x + S - \delta_x \tan^2\theta, y) + W_{\Delta z} + \delta_x \tan\theta = \\ &W(x + R\phi \cos\beta - \delta_x \tan^2\theta, y) + \\ &R\phi \sin\beta + \delta_x \tan\theta, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\delta_{\Delta x}$ 和 $\delta_{\Delta z}$ 为旋转点的偏移量 δ_x 分别在 x 和 z 方向上对波面引入的偏移量。此时, 干涉图的波差表达式为

$$\Delta W_x = W_1 - W_2 =$$

$$\begin{aligned} &W(x, y) - W(x + R\phi \cos\beta - \delta_x \tan^2\theta, y) - \\ &R\phi \sin\beta - \delta_x \tan\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可知, 当旋转角度 θ 很小, 偏移量 δ_x 较小时, $\delta_x \tan^2\theta$ 的量级将很小, 对波差的影响不大, 而且 $R\phi \sin\beta$ 项因只随 x ($|R\sin\beta| = x$) 变化, 属倾斜项, $\delta_x \tan\theta$ 为常数项, 这两项为调整误差, 可通过通常波面处理过程中的消倾斜和消离焦等方法消除。

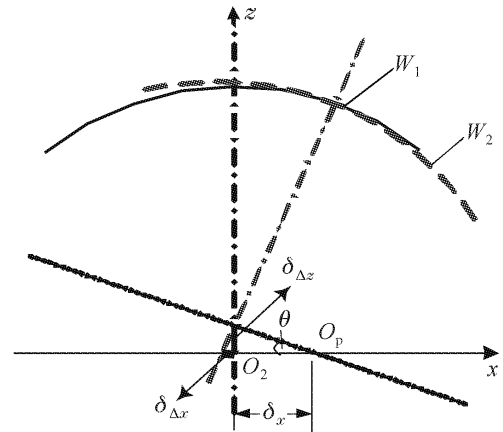


图 4 反射镜 M_1 旋转中心偏离 O_2 时波面错位示意图

Fig. 4 Sheared wavefront when the rotating center of mirror M_1 departing from O_2

3 模拟分析

3.1 会聚光剪切干涉图的模拟

应用 Zemax 光学设计软件, 结合 Matlab 的数据处理, 模拟出会聚光存在像差时的剪切干涉图。图 5 给出了会聚光存在球差时的剪切干涉图, 会聚光波的球差量为 3.36λ , 反射镜 M_1 分别在纸面内或垂直于纸面的方向上旋转 1° , 产生 x 或 y 方向的波面剪切。

球差是对称性像差, 在一般的平行光横向剪切干涉中得到的干涉条纹也是对称的, 但在会聚光横向剪切中, 由(6)式可知, 错位波面出现随 β 角而变

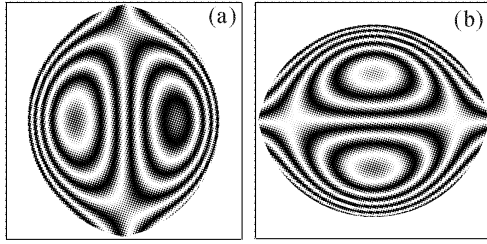


图 5 存在球差时不同剪切方向的横向剪切干涉图
(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 5 Shearing interferograms of spherical aberration in different directions
(a) x direction; (b) y direction

4 实验

4.1 实验系统

为了进一步研究会聚光剪切干涉的干涉图形成与处理方法,验证原理分析,建立了会聚光剪切干涉测试的实验系统。实验中,测试了通光孔径为 25 mm,焦距为 110 mm 的透镜组产生的会聚光波面质量,并与用 Zygo-GPIXP 干涉仪的测量结果对比。图 7 是会聚光剪切干涉部分的实物照片。

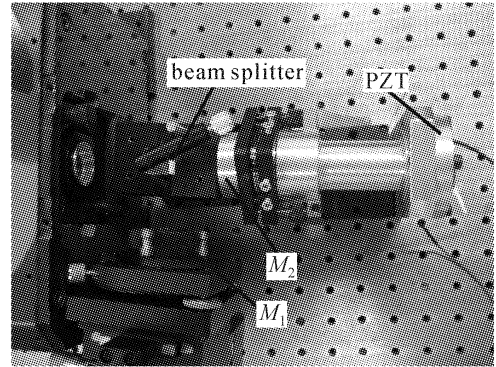


图 7 会聚光剪切干涉测试装置照片

Fig. 7 Photo of the shearing interferometer using a convergent beam

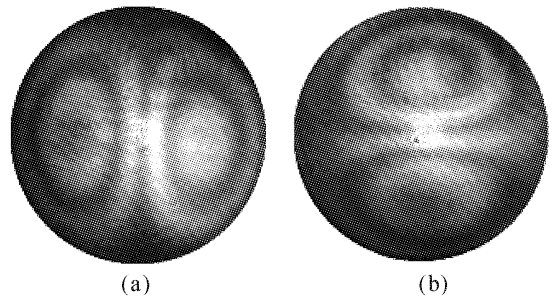


图 8 x 方向(a)和 y 方向(b)的横向剪切干涉图
Fig. 8 Lateral shearing interferograms of x (a) and y (b) directions

4.2 实验结果

实验采用千分螺杆来推动反射镜 M_1 的旋转(如图 7 所示),剪切量的获取方法可由千分螺杆旋转的格值计算^[9]。如果 M_1 的旋转角度 $\theta = 0.3^\circ$ 时,采集得到的干涉图如图 8 所示。

一般在长光程的会聚光检测中,口径与波面曲率半径之比很小。实验中,产生会聚光的透镜组通光口径为 25 mm,焦距为 110 mm,相应的 $\cos\beta_{\max} \approx 1$ (β_{\max} 为 β 的极大值),按照(3)式,剪切量 $S \approx R\phi$,可作为常量。

对 x, y 方向上的干涉图分别进行移相,经专用软件包处理得到相应的泽尼克系数,然后应用横向

化的偏移量,错位波面的对称性被打破,所以在得到的干涉图中,图 5(a)中左右条纹内圈和图 5(b)中上下条纹内圈中心灰度呈现反差,反映了不对称性这一特征。

3.2 移相的引入方法

通常,剪切干涉的干涉图分析依靠单幅干涉图法处理,精度低,易受噪声影响,而移相技术是精度很高的方法^[8]。为此,在图 1 所示的干涉仪原理光路图中,将反射镜 M_2 由压电陶瓷移相器推动,形成移相。移相干涉图由 CCD 采集,数字化后送入计算机,剪切波面由专用软件处理。

当然在移相过程中反射镜 M_2 在光轴方向作平移,可能会引入径向剪切量或波面离焦。但由于移相时反射镜 M_2 沿光轴方向的平移量最长为 $\lambda/2$ (四步法),因此移相造成的径向剪切比很小,离焦引入的波差也小于 $\lambda/100$,故可不予考虑。实验系统原理框图如图 6 所示。

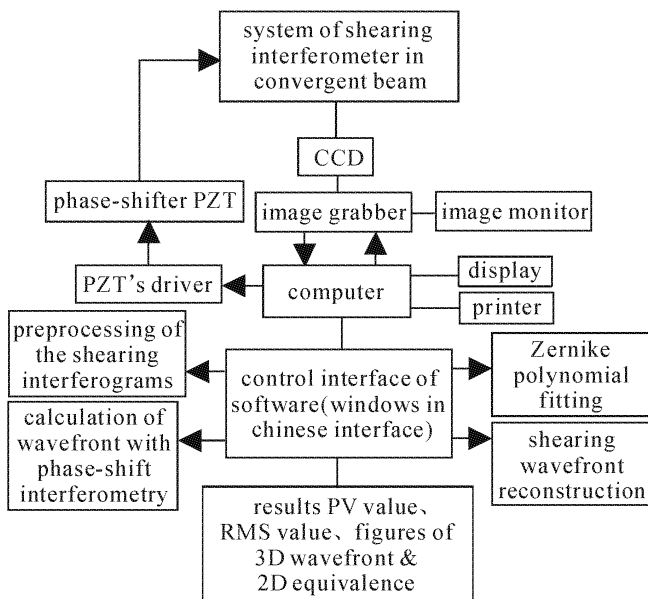


图 6 实验系统的原理框图

Fig. 6 Principle frame of experimental system

剪切干涉的一阶微分算法^[10]进行波面复原,得到原始波面的泽尼克(Zernike)系数、峰谷值(PV)和均方根(RMS)值。在相同条件下,连续测量 8 次,得到测量结果峰谷值和均方根值如表 1 所示,其峰谷值的重复性为 0.022λ , 均方根值的重复性为 0.014λ 。

表 1 多次测量的实验结果(单位: λ)

Table 1 Experimental results of multiple measurement (unit: λ)

	PV	RMS value
1	2.574	0.537
2	2.576	0.549
3	2.618	0.563
4	2.615	0.558
5	2.623	0.568
6	2.631	0.583
7	2.620	0.575
8	2.617	0.562
Mean	2.609	0.562

表 2 实验结果与 Zygo 干涉仪上测得值的对比

Table 2 Results comparison with that by Zygo interferometer

	PV	RMS value
Experimental mean value / λ	2.609	0.562
Mean value by Zygo / λ	2.649	0.570
Absolute error / λ	0.040	0.008
Relative error /%	1.51	1.40

为了验证和对比会聚波面移相剪切测量方法的准确性,将产生会聚光波面的透镜组放进 Zygo 干涉仪中进行测试,也经 8 次测量,分别求出测试结果峰谷值和均方根值的平均值,结果如表 2 所示。

由表 2 可见,同一被测会聚波面,采用会聚光移相剪切干涉直接测量会聚波面质量和 Zygo 干涉仪测量的相比,波面中局部高低形状结果是一致的,峰谷值的相对误差为 1.51%,均方根值的相对误差为 1.40%。

5 结 论

提出一种以会聚光波直接作为干涉测试光源的会聚光移相剪切干涉方法。会聚光横向剪切干涉属

于横向旋转剪切,它的剪切量以及错位波面相对于原始波面存在光轴方向的偏移量都不是一个定值,都是随剪切方向对应的波面坐标值变化。实验结果表明,会聚光横向剪切中引入移相时产生的径向剪切和离焦不会影响移相剪切干涉的结果,通过移相技术来解决剪切干涉图处理是可行的,它能够实时测试会聚光的波面质量,峰谷值的重复性达到 0.022λ , 均方根值的重复性为 0.014λ 。如将迈克耳孙干涉仪、压电陶瓷移相器和干涉图像接收系统集成为一小型化测量组件,可方便应用于测量自由空间激光通信中光学接收天线的会聚光质量(无需使用带有误差的波面转换系统)、长焦距光学系统或大曲率半径光学零件的波面质量,以及应用于检测多组分镜片光学镜头逐片装校过程中的波面质量。

参 考 文 献

- 1 Michael R. Descour, Mark R. Willer, Dana S. Clarke *et al.*. Misalignment modes in high-performance optical systems [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7):1737~1747
- 2 Zhang Lei, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Wavefront sensing technology for inter-orbit satellite laser communications [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(4):14~19
章 磊,刘立人,栾 竹等. 星间激光通信中的波前传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(4):14~19
- 3 Xu Deyan. *Shearing Interferometer and Its Applications* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 53~56
徐德衍. 剪切干涉仪及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 1987. 53~56
- 4 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1992. 144~151
- 5 Ho-Jae Lee, Seung-Woo Kim. Precision profile measurement of aspheric surfaces by improved Ronchi test [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(6):1041~1047
- 6 Tae-Joon Hwang, Seung-Woo Kim. Phase-shifting diffraction grating interferometer for testing concave mirrors [C]. *SPIE*, 2003, **5144**:451~459
- 7 Kiyofumi Matsuda, Hideo Furuhashi, Chander P. Grover. Lateral shearing interferometer for large aperture; merit consideration and analysis [C]. *SPIE*, 2003, **4829**:926~927
- 8 Gao Zhishan, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. A portable phase-shifting interferometer with optical zoom system [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2004, **43**(5):417~419
- 9 Wu Zhen. Triangular shearing interferometer automatic test system [D]. *Master Paper of Nanjing University of Science & Technology*, 2000. 12~14
吴 桢. 三平板剪切干涉仪自动测试系统 [D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2000. 12~14
- 10 Pan Junhua, Chen Jinbang, Yang Yonggang. *Handbook of Measurement Technology-10: Optics* [M]. Beijing: Chinese Measurement Press, 1997. 666~667
潘君骅,陈进榜,杨永刚. 计量测试技术手册,第 10 卷,光学 [M]. 北京:中国计量出版社, 1997. 666~667