

文章编号 1004-924X(2016)12-3005-07

用计算全息法测量长焦透镜的透射波前

魏小红, 何宇航, 高 波, 徐凯源, 李 强, 柴立群*

(中国物理工程研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:为了高精度地检测长焦透镜的透射波前, 提出了在 Zygo 干涉仪的平面光路中加入一个二元衍射元件提供参考波前的计算全息法(CG H)。介绍了计算全息法检测长焦透镜透射波前的理论, 设计并研制了高精度计算全息板, 并将其用于大口径长焦距透镜透射波前检测。理论分析和实际检测结果表明:该方法系统误差小, 测量重复性精度优于 $0.004\lambda(2\sigma \text{ RMS})$, 与常规的非索干涉法测量球面透镜透射波前得到的结果一致, 从而验证了提出测量方法的可靠性。最后, 详细分析了二元衍射元件的制造误差对透射波前检测的影响, 得到测量误差(PV)小于 $\lambda/10$ 。文中的结果表明提出的计算全息法可有效缩短光路, 提高测量精度, 对长焦透镜波前检测有重要的应用价值。

关键词:长焦透镜;透射波前;光学检测;干涉检测;计算全息术;误差分析

中图分类号:TH703;O438.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162412.3005

Measurement of transmissive wavefront of long-focal length lens by computer-generated holography

WEI Xiao-hong, HE Yu-hang, GAO Bo, XU Kai-yuan, LI Qiang, CHAI Li-qun*

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 610041, China)

* Corresponding author, E-mail: xhwei4@126.com

Abstract: To measure the transmissive wavefront of a long-focal length lens precisely, a novel Computer Generated Holography (CGH) was proposed by adding a binary diffractive optical element into the Zygo interferometer to provide a reference wavefront. The theory of transmissive wavefront measurement of large convex lens by using the CGH was introduced. A high precision computed holographic plane was designed and developed to apply in the measurement of the transmissive wavefront of the long-focal length lens. The theory analysis and practical test show that the proposed method has a lower systematic error, and the measuring repeatability of the CGH is better than $0.004\lambda(2\sigma \text{ RMS})$. The result is in agreement with that of common Fizeau interferometry, and verifies the feasibility of the proposed CGH. Finally, the measurement uncertainty due to the substrate error and hologram fabrication processes was analyzed, and the wavefront peak-valley error is less than $\lambda/10$. It concludes that the CGH method greatly shortens the airspace, improves measurement precision, and is of great importance for the wavefront measurement of long focal length lenses.

Key words: long-focal length lens; transmissive wavefront; optical test; interferometry; Computer-generated Holography(CG H); error analysis

收稿日期:2016-10-11;修订日期:2016-11-12.

基金项目:中物院校准和测试实验室研究项目(No. 155009)

1 引言

现代光学发展对光学元件的需求日趋增大。为保证光学系统的性能,要求光学元件的加工精度小于 1 个波长,由此发展了很多高精度的光学测试方法^[1-3]。

透镜的焦距、曲率半径、折射率、波前等参数的检测在很多应用领域都非常重要,其中,透镜的波前参数可提供透镜表面质量方面的信息。常见的测量透镜波前的方法有干涉法^[4-7],朗奇光栅法^[8],夏克-哈特曼方法^[9]和数字全息干涉法^[10]等。

干涉法是通过与一块标准球面镜做比较得到被测透镜的波前。干涉图直接显示被测面与参考面之间的偏差。然而,高精度标准球面加工困难,且造价高昂;对于大口径长焦距透镜的波前检测操作性较差。

朗奇光栅法通过计算莫尔条纹的偏移得到透镜波前信息,但该方法测量精度较低。夏克-哈特曼法通过对微透镜采集到的波前梯度,利用最小二乘法计算得到波前信息,测量精度与微透镜的数目及探测器有关,对大口径透镜波前检测而言,测量效率较低。

计算全息板(CGHs)是由计算机辅助设计的衍射元件,它可以产生任何需要的振幅和位相的波前,在光学测试领域已被广泛应用^[11-14]。现在,CGH 可通过离子束刻蚀或激光直写^[15,16]等方法加工。

计算全息法测量透镜透射波前,其误差来源包括设计误差,调节误差和加工误差。Chang 和 Burge^[17,18]首次提出了数学模型来描述 CGH 法用于波前检测的误差。基于此理论,分析并计算了测量不确定度。

本文介绍了计算全息法测量透镜透射波前的原理,理论分析和实验表明,该方法测量精度可达 $\lambda/10$ 。与常规的非索干涉法测量球面透镜透射波前的比对实验表明,该方法可有效缩短光路,且测量光路简单,精度高,可有效应用于长焦透镜透射波前检测领域。

2 CGH 的设计和检测方法

2.1 测量原理

当使用 CGH 检测非球面时,CGH 相当于一个衍射光栅,可通过改变光栅图样的间距来控制衍射光波的斜率,通过合理设计光栅图样,可使得通过待测透镜的光波经 CGH 衍射后原路返回,且测量光路紧凑,最大限度的减少震动、气流等扰动。检测光路由平面干涉仪、被测透镜、菲涅尔波带片组成,如图 1 所示。

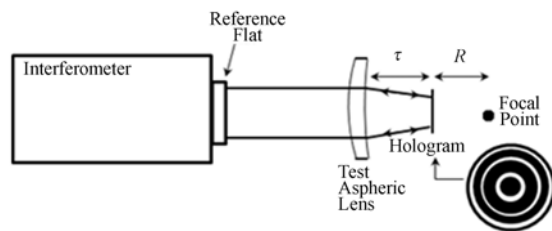


图 1 使用 CGH 测量凸面透射镜的光路图

Fig. 1 Experimental setup for measuring wavefront of a test lens

干涉检测系统的测试波长为 632.8 nm,干涉仪输出的准直平行光通过标准平面镜时,一束由标准平面镜参考面反射形成标准参考光束,另一束透过被测透镜、经波带片反射沿原路返回形成测试光束;测试光束与标准参考光束发生干涉,调整空间滤波器透镜,使干涉条纹最少,即可测量得到空间滤波器透镜透射波前。

按照图 1 所示光路,在放入被测透镜前先测量菲涅尔波带片 0 级反射波前,该波前表征菲涅尔波带片基底的平整度,以此作为背景波前;其次将菲涅尔波带片放入光路,调节波带片与待测透镜的间距至设计值并测组合波前,两次波前测量结果之差即为长焦距透镜透射波前。

使用 CGH 的优势有两点:CGH 衍射图形仅为圆形二进制光栅,因此光刻加工简单,且相对于球面镜的加工成本低廉;长焦距凸面透镜若是用常规补偿法检测,光路较长,但使用 CGH 可大大缩短光路,从而提高检测精度。

2.2 CGH 的设计

对于理想的球面透镜,可根据待测透镜的焦距 f ,确定菲涅尔波带片的曲率半径 R ,即 $R = f - \tau$,其中 τ 为待测透镜与波带片之间的间距。波

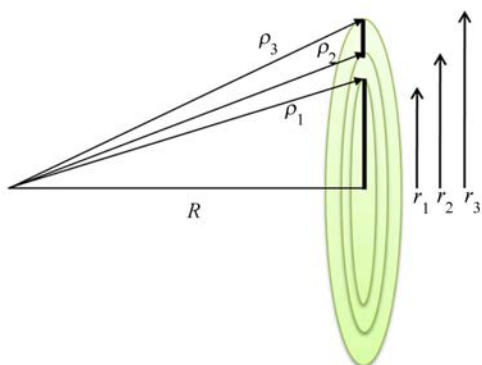


图 2 菲涅尔波带片圆环半径的设计示意图

Fig. 2 Geometric diagram for determining the Fresnel-zone (i.e., hologram ring) boundary locations

波片的环带半径可通过图 2 所示的几何关系来确定:以波带片的中心为原点,波带片每两个相邻带到焦点处的光程差为半波长,即:

$$\begin{aligned} r_n &= (\rho_n^2 - R^2)^{1/2} \\ 2\rho_n - 2R &= n(\lambda/2) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)给出了波带片曲率半径的数学描述。波带片总的圆环数由被测光路的几何结构决定。

对于像差不可忽略的透镜,应根据被测透镜的焦距,确定第一级衍射曲率半径(与焦距大小相当),使得干涉腔长缩短至适合检测操作;其次,根据费马等光程原理,计算菲涅尔波带片的位相分布。设计菲涅尔波带片的几何示意如图 3 所示。从平面干涉仪出射的平行光经被测透镜、菲涅尔波带片的所有光线的光程均相等,即有:

$$n_0 |PQ| + n_1 |QM| + n_2 |M/V| + \phi(r) = C, \quad (2)$$

其中:C为常数。由此可得:

$$\phi(r) = n_0 d_1 + n_1 d_2 + n_2 d_3 - (n_0 |PQ| + n_1 |QM| + n_2 |MV|). \quad (3)$$

根据位相分布方程得到菲涅尔波带片的各环带半径参数,从而使用激光直写、离子束刻蚀等方法制作菲涅尔波带片。

此外,在设计波带片时还需考虑以下两点:选择合适加工波带片的光学材料;整个光学系统的长度要合适,且波带片能够加工出来。

3 实 验

3.1 小口径比对实验

为验证菲涅尔波带片法测量透镜透射波前检

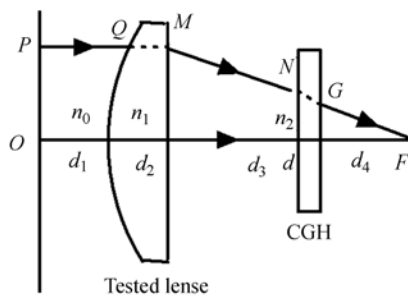


图 3 设计全息版几何示意图

Fig. 3 Geometric diagram for the design of CGH

测方法的可行性与准确性,加工了 1 块小口径菲涅尔波带片进行验证实验。针对实验室已有的直径为 $\Phi 80$ mm,焦距 $f=1\ 500$ mm 的小口径透镜,设计了曲率半径为 $R_1=1\ 200$ mm,直径为 $\Phi 80$ mm 的波带片。波前检测使用的是波带片-1 级衍射波前,这样被测透镜与波带片之间的间距 $\tau = f - R_1 = 300$ mm。波带片的基板反射面形 $PV = 0.097\lambda$, $RMS = 0.017\lambda$,其中 $\lambda = 632.8$ nm。基板检测结果如图 4 所示。

项目	内容	单位
PV	0.0973	λ
RMS-	0.0167	λ
	10.580	nm
RMS	0.0167	λ
	10.580	nm
-----	-----	----
波长	632.800	nm
光程系数	0.500	

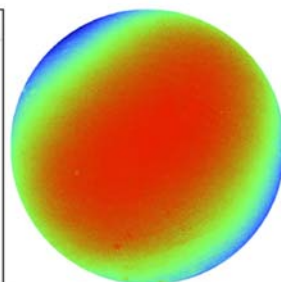


图 4 菲涅尔波带片基板反射面形分布

Fig. 4 Reflective wavefront of zoneplate substrate

波带片法测量透镜光路如图 1 所示;斐索干涉法检测透镜的光路如图 5 所示,利用干涉仪精确定位标准球面透镜与待检光学元件的共焦点或共心点,使反射的测试光束与标准参考光束发生干涉,即可测量得到待检光学元件的波前畸变。

将通光口径取为 $\Phi 70$ mm,与斐索干涉法检测结果作比较,波前分布如图 6 所示,图 6(a)中中心圆形缺失数据为多级衍射干涉形成的热斑所致,图 6(b)中圆形缺失数据为透镜后表面反射光斑所致。从检测结果可知,两种方法测得的波前分布及大小基本一致,证明波带片法可以用来测量球面镜的透射波前。

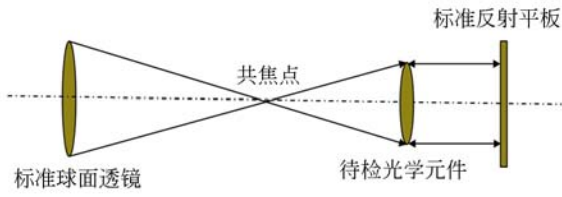
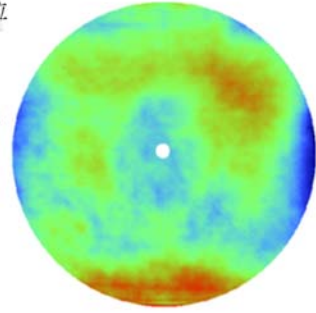


图 5 斐索干涉法测量球面光学元件的光路

Fig. 5 Fizeau interferometry method for measuring wavefront of a lens under test

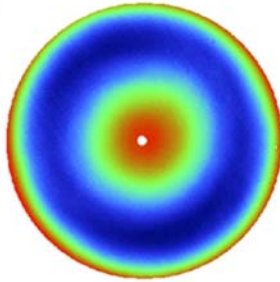
项目	内容	单位
PV	0.1151	λ
RMS	0.0137	λ
	8.644	nm
RMS	0.0137	λ
	8.644	nm
-----	-----	---
波长	632.800	nm
光程系数	0.500	



(a) 波带片 0 级波前检测结果

(a) 0 order of CGH

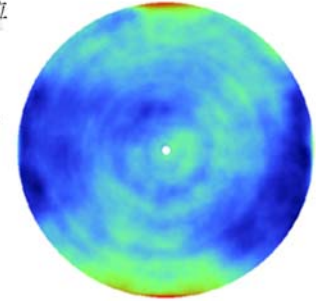
Wavelength	632.80 nm
Wedge	0.50
X/Y Size	578×581
Pixel size	0.00 μ m
Date	01/01/1980
Time	12:00:00
Averages	
Analysis Results	
Pv	0.309 wv
Ra	0.061 wv
Rms	0.0719 wv
20 Pt.PV	0.301 wv



(a) 斐索干涉法

(a) CGH method

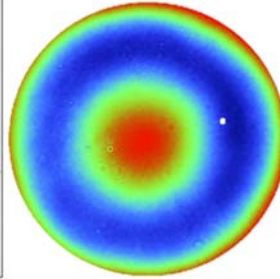
项目	内容	单位
PV	0.3019	λ
RMS	0.0347	λ
	21.929	nm
RMS	0.0347	λ
	21.929	nm
-----	-----	---
波长	632.800	nm
光程系数	0.500	



(b) 透镜波前检测结果

(b) Transmission wavefront of lens under test

Wavelength	632.80 nm
Wedge	0.50
X/Y Size	686×687
Pixel size	0.00 μ m
Date	01/01/1980
Time	12:00:00
Averages	
Analysis Results	
Pv	0.316 wv
Ra	0.050 wv
Rms	0.0618 wv
20 Pt.PV	0.310 wv



(b) 斐索干涉法

(b) Fizeau interferometry method

图 6 测量透镜透射波前检测结果

Fig. 6 Transmission wavefront of a lens tested

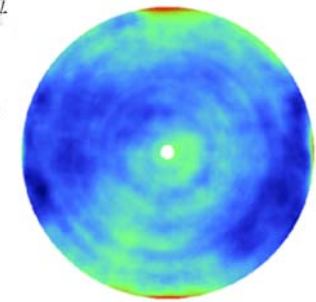
3.2 大口径长焦距透镜透射波前检测实验

干涉检测波长 λ 为 632.8 nm, 被测凸面透镜的尺寸和焦距分别为 $\Phi 430$ mm 和 30 725 mm, 波带片的 1 级曲率半径为 30 225 mm, 尺寸为 $\Phi 430$ mm, 波带片与被测镜之间的间距 τ 为 500 mm.

透射波前检测结果如图 7 所示, 通光口径为 $\Phi 420$ mm, 干涉波前均去除离焦。

为了测试系统的测量重复性精度, 对待测透镜测试 10 组数据, 每组数据为 6 次平均, 计算这 10 组数据的波前平均值并作为参考面, 然后用各

项目	内容	单位
PV	0.2692	λ
RMS	0.0285	λ
	18.054	nm
RMS	0.0285	λ
	18.054	nm
-----	-----	---
波长	632.800	nm
光程系数	0.500	



(c) 去除 0 级波前后透镜波前分布

(c) Transmission wavefront that subtract the substrate error of CGH

图 7 透射波前检测结果

Fig. 7 Test result

组数据减去该参考面得到 10 组波前残差, 并计算各组数据波前残差的 RMS 值的平均值 mean 和标准差 σ , 系统的重复性由 $(\text{mean} + 2\sigma)$ 得到, 如表 1 所示。

表 1 计算全息法测量透镜透射波前重复性

Tab.1 Repeatability of CGH method

	RMS ₁	RMS ₂	RMS ₃	RMS ₄	RMS ₅	RMS ₆	RMS ₇	RMS ₈	RMS ₉	RMS ₁₀	重复性
Lens	0.003 1	0.002 2	0.001 6	0.002 1	0.003 0	0.001 8	0.002 0	0.003 4	0.002 7	0.003 4	0.003 9

4 误差分析

CGH 法测量的误差来源有设计误差、调节误差和加工误差。在本实验中,设计误差几乎为 0,在此,主要关注 CGH 的加工误差和调节误差对波前检测的影响。

4.1 CGH 加工误差

在光学检测中,通常实验圆形二进制全息版,因为它易于加工且衍射效率较高。同时,由于是圆对称,全息版的设计和分析就从二维简化为一维。

一维线性光栅的结果如图 8 所示。光栅的周期为 p ,刻蚀深度为 t ,占空比 $D=b/p$, \square 为光栅不同结构处的位相差。

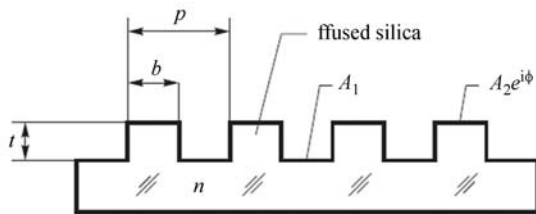


图 8 一维线性光栅的轮廓示意图

Fig.8 Unidimensional linear grating profile

远场波前相位 ψ 可通过 Fraunhofer 衍射理论得到。引入波前相位灵敏函数 $\frac{\partial \Psi}{\partial D}$, $\frac{\partial \Psi}{\partial \square}$ 和 $\frac{\partial \Psi}{\partial A_1}$ 来描述由于占空比 ΔD 、位相函数 $\Delta \square$ 等刻蚀引入的误差和振幅调制 ΔA_1 带来的波前误差。灵敏函数如表 2^[18] 所示,波前误差 ΔW 与位相误差的关系为 $\Delta W = \frac{L_0}{2\pi} \Delta \Psi$ 。

CGH 的加工误差分为基底误差,图形畸变误差,占空比误差,刻蚀深度误差和表面粗糙度引入的误差。

表 2 线性光栅的灵敏函数

Tab.2 Sensitivity functions

	Zero order ($m=0$)	Non-zero order ($m \neq 0$)
$\frac{\partial \Psi}{\partial D}$	$\frac{A_1 A_2 \sin \square}{A_2^2 D^2 + A_1^2 (1-D)^2 + 2A_1 A_2 D(1-D) \cos \square}$	$\begin{cases} \infty, & \text{for } \sin \epsilon(mD) = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
$\frac{\partial \Psi}{\partial \square}$	$\frac{A_2^2 D^2 + A_1 A_2 D(1-D) \cos \square}{A_2^2 D^2 + A_1^2 (1-D)^2 + 2A_1 A_2 D(1-D) \cos \square}$	$\frac{A_2^2 - A_1 A_2 \cos \square}{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos \square}$

基底误差通常引起低频畸变,可通过平行光来测试,测量光路如图 9 所示。

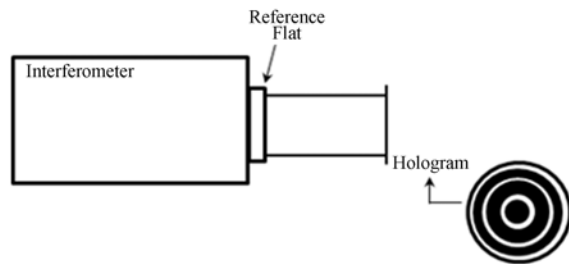


图 9 CGH 基底误差测量光路

Fig.9 Experimental setup for measuring the substrate error of a CGH

CGH 图形误差是由于刻蚀时偏离理想图形引入的误差,其引入的波前畸变正比于条纹偏离量:

$$\Delta W(x, y) = -m\lambda \frac{\epsilon}{P}, \quad (4)$$

其中: ϵ 为光栅在垂直条纹方向的位置误差, m 为衍射级次, S 为光栅周期。

除此,占空比(D)和刻蚀深度(\square)也是误差源。波前灵敏函数提供了描述此加工误差引入的波前畸变的方法,由 CGH 加工引入的波前 RMS 误差如表 3 所示。

表 3 由 CGH 加工引入的波前误差

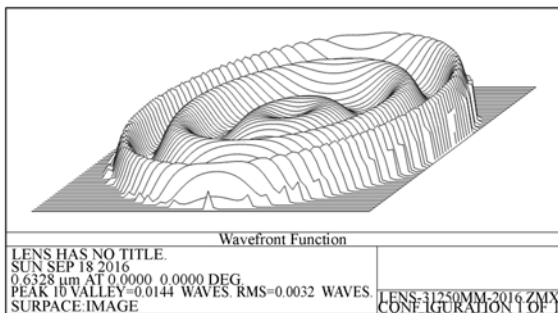
Tab.3 Wavefront error induced by the manufacturing of CGH

误差源	加工引入的误差	波前畸变
图形误差	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm \lambda/25$
占空比误差	$\pm 2\%$	0
刻蚀深度误差	$\pm 5\%$	$\pm \lambda/40$

4.2 CGH 调节误差

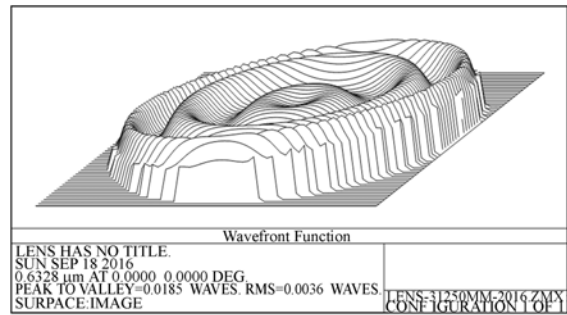
在实验中,使用五维调节架来调节被测凸面透镜和波带片的姿态,则调节误差包括对 x (或 y)轴的平移偏离和偏轴及被测镜与波带片间的距离偏差。其中,两镜之间的间距误差会引入离焦,可通过数据处理扣除,故主要分析平移和倾斜引入的调节误差。

通过 ZEMAX 模拟了调节引入的误差,波前分布如图 10 所示。当平移量为 $200\ \mu\text{m}$, 倾斜量为 $10''$, 引入的波前误差分别为 $0.0144\lambda\text{PV}$, $0.0032\lambda\text{RMS}$ 和 $0.0185\lambda\text{PV}$, $0.0036\lambda\text{RMS}$ 。



(a) 平移

(a) TIP



(b) 倾斜

(b) Tilt

图 10 引入的波前误差

Fig. 10 Wavefront error induced

5 结 论

本文使用菲涅尔波带片法测量透镜的波前。相对于加工同样精度的球面镜,加工一块菲涅尔波带片的难度更低,成本也更低;测量长焦距透镜的波前时,菲涅尔波带片法可大大缩短光路,降低振动、气流扰动等干扰,提高测量精度。

参考文献:

- [1] MALACARA D. Optical Shop Testing [J]. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [2] ROCKTÄSCHEL M, TIZIANI H J. Limitations of the Shack-Hartmann sensor for testing optical aspherics [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34: 631-637.
- [3] GREIVENKAMP J E, GAPPINGER R O. Design of a nonnull interferometer for aspheric wave fronts [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(27): 5143-5152.
- [4] HOUSTON J B, BUCCINI C J, O'NEILL P K. A Laser Unequal Path Interferometer for the Optical Shop [J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6(7): 1237-1242.
- [5] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, et al.. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lens [J]. *Appl. Opt.*, 1974, 3(11): 2693-2703.
- [6] SCHULZ G, SCHWIDER J. Interferometric testing of Smooth Surfaces [J]. *Progress in Optics XIII* (E. Wolf ed.), 1976, 93-167.
- [7] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, et al.. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1983, 22(21): 3421-3433.
- [8] HOU C L, BAI J. Wavefront measurement for long focal large aperture lens based on Talbot effect of Ronchi grating [J]. *J. of Phy: Conf. Ser.*, 2006, 48: 1037-1041.
- [9] YOON G Y, JITSUNO T, NAKATSUKA M, et al.. Wavefront measurement with a large F-number plastic microleln array [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35: 188-192.
- [10] CAI L Z, LIU Q, YANG X L, et al.. Sensitivity adjustable contouring by digital holography and virtual reference wavefront [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 221: 49-54.
- [11] MACGOVEM A J, MYANT J C. Computer generated holograms for testing optical elements [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(3): 619-624.
- [12] REICHEL T S, PRU C, TIZIANI H J. New design techniques and calibration methods for CGH-null

- testing of aspheric surfaces[J]. *Proc. SPIE*, 2002, 4778:158-168.
- [13] HERRMANN T. Testing aspheric surfaces with CGH of different accuracy in industrial manufacturing environ[J]. *Proc. SPIE*, 2001, 4440: 120-126.
- [14] SCHREINER R, HERRMANN T. Computer generated holograms for optical shop testing of aspheres [J]. *Proc. SPIE*, 2005, 5856, 503-508.
- [15] 胡进, 董晓轩, 浦东林, 等. 基于闪耀光栅图形化实现高分辨率干涉光刻[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3335-3342.
- HU J, DONG X X, PU D L, *et al.*. High resolution pattern-integrated interference lithography based on blazed grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3335-3342. (in Chinese)
- [16] 张健, 栗孟娟, 阴刚华, 等. 用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6):1289-1296.
- ZHANG J, LI M J, YIN G H, *et al.*. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1289-1296. (in Chinese)
- [17] CHANG Y C, BURE J H. Errors analysis for CGH optical testing[J]. *Proc. SPIE*, 1999, 3782: 358-366.
- [18] CHANG Y C, ZHOU P, BURGE J H. Analysis of phase sensitivity for binary computer generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (18): 4223-4234.

作者简介:



魏小红(1981—)女,陕西宝鸡人,副研究员,2004年于国防科技大学获得学士学位,2009年于复旦大学获得博士学位,主要从事光学精密检测方面的研究。E-mail: xhwei4@126.com.



高波(1983—),男,四川遂宁人,硕士,助理研究员,2008年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: cowboytear@hotmail.com