

基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法

何宇航*, 李强, 高波, 魏小红, 柴立群

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 针对大口径非球面透镜透射波前检测, 提出了采用计算全息元件(CGH)作为光路相位补偿元件进行检测的方法。大口径非球面透镜透射波前通常采用球面干涉仪进行检测, 为了达到零位检测的目的, 在光路中往往需要加入相位补偿元件以补偿高阶像差(HOA)。传统的折射式相位补偿元件的精度溯源比较困难, 导致检测数据缺乏可信度。将 CGH 作为相位补偿元件可达到零位检测的目的。针对大口径非球面透镜的透射波前检测, 设计并加工了相应的 CGH 作为相位补偿元件, 并与传统的折射式补偿元件进行了对比测试。测试结果表明: 两种相位补偿方法的测试数据具有良好的一致性, 峰谷(PV)值的差值为 0.034λ (λ 为检测光的波长), 均方根(RMS)值的差值为 0.006λ , 因此 CGH 作为相位补偿元件具有相当高的测试精度。

关键词 测量; 计算全息元件; 干涉检测; 零位测试; 相位补偿; 测量精度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.021202

Measurement of the Transmission Wavefront of a Large-Aperture Aspheric Lens Based on Computer-Generated Hologram

He Yuhang*, Li Qiang, Gao Bo, Wei Xiaohong, Chai Liqun

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract To measure the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens, we propose a method by using a computer-generated hologram (CGH) as a phase compensation element. The transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens is typically tested by a sphere interferometer. To conduct a null test, phase compensation is required to compensate for high-order aberrations (HOAs). However, validating the accuracy of conventional refractive-phase compensation elements is difficult, and they therefore generate unreliable measurement results. An alternative type of phase compensation employs a CGH, which is a diffraction element that can also be used to conduct a null test. To conduct a null test for the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens, we design and manufacture a CGH. A contrast test is implemented with two different phase compensation elements, which results in two measured data those are very similar to one another, between which the peak valley (PV) difference is 0.034λ (λ is the wavelength of the detect light), and the root mean square (RMS) difference is 0.006λ . Therefore, the null-test method using a CGH proposed in this study displays a high degree of accuracy.

Key words measurement; computer-generated hologram; interference test; null-test; phase compensation; measurement accuracy

OCIS codes 120.4800; 120.3940; 120.3180

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)的高功率激光驱动装置中^[1-2], 大口径非球面透镜位于装置的末端, 起着将

激光光束聚焦到靶丸的作用, 其透射波前将直接影响焦斑的波前质量。对于大口径非球面的透射波前检测, 目前主要采用的是基于球面干涉仪的零位检测法。该方法采用折射式的相位补偿元件将球面波

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-06-30; 录用日期: 2018-07-26

* E-mail: hang_yu_he@163.com

前转换为与非球面透镜相匹配的非球面波前。但是,补偿镜的透射波前难以溯源,影响了非球面透镜透射波前检测数据的置信度。

自从 1971 年美国亚利桑那光学中心 MacGovern 和 Wyant 将计算全息元件(CGH)用于非球面检测以来^[3],得益于计算机技术和微纳加工技术的发展,CGH 的制作精度越来越高。CGH 也被大量用于非球面、自由曲面等具有复杂曲面的光学元件的检测中^[4-17]。

为了提高高功率激光驱动装置中的大口径非球面透镜透射波前检测数据的置信度,本文提出采用 CGH 作为相位补偿元件来实现零位检测,并与传统的折射式补偿元件检测方法进行对比测试。介绍了基于 CGH 的大口径非球面透镜透射波前检测的原理、CGH 的设计方法及其引入的波前误差,最后进行实验,并对实验结果进行了分析。

2 检测原理

针对高功率激光驱动装置中的大口径非球面透镜透射波前检测,采用折射式补偿镜的零位检测方法的光路图如图 1 所示。球面干涉仪焦点发出的球面光束经过补偿镜后被转化为与非球面透镜相匹配的非球面波前,再经过平面反射镜后沿原路返回,最后与球面干涉仪的参考光束干涉,从而实现干涉检测。

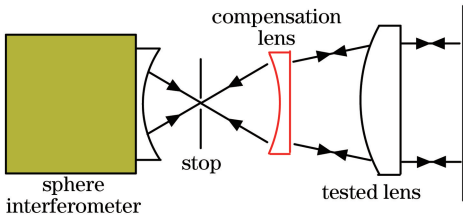


图 1 采用折射式补偿镜检测大口径非球面透镜的光路示意图

Fig. 1 Optical path of a large-aperture aspheric lens detected by a refractive compensation mirror

用 CGH 替换图 1 光路中的折射式补偿镜,采用衍射的方式实现球面波前到非球面波前的转换,可以达到相同的零位检测的目的,检测光路图如图 2 所示。

CGH 为类光栅结构,通过改变不同位置处光栅刻线的间距来改变出射光线偏折的角度,从而实现光束波前的调制。CGH 在检测光路中的位置需要合理选择。如果 CGH 离干涉仪焦点位置太近,则 CGH 尺寸较小,刻线的线宽会很窄。受加工工艺的限制,刻蚀的误差会加大,一般 CGH 线宽在 10 μm

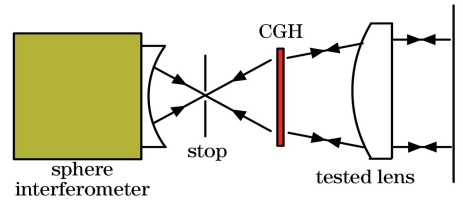


图 2 采用 CGH 检测大口径非球面透镜光路示意图
Fig. 2 Optical path of a large-aperture aspheric lens detected by a CGH

以上是比较好的选择。如果 CGH 离干涉仪焦点位置太远,则 CGH 的尺寸会增大,制作成本会加大。

3 CGH 的设计及波前误差分析

3.1 CGH 的设计

CGH 的设计主要分为两步:相位函数的计算和对相位函数进行二元编码。

3.1.1 CGH 相位函数的计算

CGH 的相位函数是指 CGH 需要补偿的相位与位置坐标之间的对应关系。由费马原理可知,由球面干涉仪焦点到平面反射镜之间的所有光线应具有相等的光程。光程示意图如图 3 所示, F 为球面干涉仪的焦点, P 为任意一条经过焦点的光线到达平面反射镜的位置,因此点 F 到点 P 之间的光程可以表示为

$$C = n_0 |FG| + p(r) + n_2 |GN| + n_0 |NM| + n_1 |MQ| + n_0 |QP|, \quad (1)$$

式中: C 表示光程; n_0, n_1, n_2 分别表示空气、被测透镜和补偿镜的折射率; r 表示 CGH 的横向坐标; $p(r)$ 表示 CGH 刻蚀端面衍射对光束相位的改变量。 C 应等于点 F 到点 O 之间的光程,即

$$C = n_0 d_1 + p(0) + n_2 d + n_0 d_2 + n_1 d_3 + n_0 d_4. \quad (2)$$

考虑到相位都是相对的,令 $p(0) = 0$,由(1)式和(2)式可得到各条光线经过 CGH 的光程:

$$p(r) = (n_0 d_1 + n_2 d + n_0 d_2 + n_1 d_3 + n_0 d_4) - (n_0 |FG| + n_2 |GN| + n_0 |NM| +$$

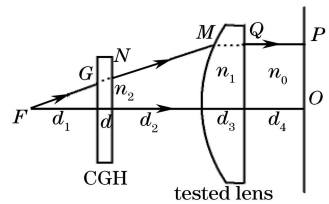


图 3 干涉仪焦点与平面反射镜之间光程示意图
Fig. 3 Schematic of optical paths between focus spot of the interferometer and planar mirror

$$n_1 |\vec{MQ}| + n_0 |\vec{QP}| \rangle). \quad (3)$$

于是可以得到 CGH 的相位函数,表达式为

$$\varphi(r) = 2\pi p(r)/\lambda, \quad (4)$$

式中: λ 为检测光波的波长。也可以采用 Zemax 等商用软件获得 CGH 的相位分布。

3.1.2 CGH 的二元编码

二元编码是对 CGH 的波前函数进行编码,得到适合在玻璃基板上刻蚀的二元图案。获得 CGH 的二元图案需要采用如下两步。

第一步:由 CGH 的相位分布确定条纹的位置。相位每改变 2π ,相应地确定一根条纹的位置,用方程表示为

$$[\varphi(r)/2\pi] = n, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (5)$$

即由(5)式获得相位为 2π 整数倍时的坐标位置。条纹位置的确定是编码的关键,决定了 CGH 偏折光

线的程度,即补偿相位的大小。

第二步:根据需要的衍射效率确定 CGH 的衍射级次、占空比、刻蚀深度等光栅参数。为了使干涉仪具有良好的条纹对比度,应该使参考光强度和检测光的强度尽量接近,因此需要尽量增大光栅的衍射效率。因为相位型 CGH 的衍射效率高于振幅型 CGH,所以本研究采用相位型的 CGH。

采用二元线性光栅模型分析 CGH 光栅面的出射光场,确定光栅参数。二元线性光栅模型如图 4 所示,光栅的周期为 S ,刻蚀深度为 d ,刻蚀区域的宽度为 b ,则占空比为 $D = b/S$, A_0 、 A_1 分别为光栅非刻蚀区域与刻蚀区域输出波前的振幅(在刻蚀表面粗糙度影响很小的情况下两者近似相等),相位 ϕ 代表了光束在光栅结构中顶部和底部之间的相位差。

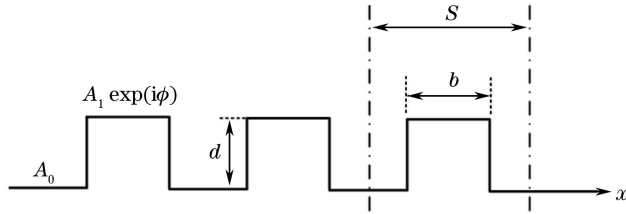


图 4 二元线性光栅模型示意图

Fig. 4 Schematic of binary linear grating model

光波经光栅面出射后,光场分布可以表示为^[13]

$$u(x) = A_0 + [A_1 \exp(i\phi) - A_0] \times \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) * \frac{1}{S} \text{comb}\left(\frac{x}{S}\right), \quad (6)$$

式中:符号 rect 和 comb 分别表示矩形函数和梳状函数;符号 * 表示求卷积。

根据夫琅禾费衍射理论,光栅出射面的远场衍射与出射光场的傅里叶变换有关,

$$U(\xi) = F[u(x)] = A_0 \delta(\xi) + [A_1 \exp(i\phi) - A_0] \times b \times \text{sinc}(b\xi) \times \text{comb}(S\xi) = \left[A_0 \delta(\xi) + (A_1 \cos \phi - A_0) \times D \times \text{sinc}(DS\xi) \times \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\xi - \frac{m}{S}\right) \right] + i \left[A_1 \sin \phi \times D \times \text{sinc}(DS\xi) \times \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\xi - \frac{m}{S}\right) \right], \quad (7)$$

式中: m 为衍射级次; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。不同级次光波的远场衍射为

$$U(\xi) = \begin{cases} [A_0 + (A_1 \cos \phi - A_0)D] + iA_1 D \sin \phi, & m = 0 \\ (A_1 \cos \phi - A_0)D \text{sinc}(mD) + iA_1 (\sin \phi)D \text{sinc}(mD), & m = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

因此,不同级次的衍射效率为

$$\eta = \begin{cases} A_0^2 (1 - D)^2 + A_1^2 D^2 + 2A_0 A_1 D (1 - D) \cos \phi, & m = 0 \\ (A_0^2 + A_1^2 - 2A_0 A_1 \cos \phi) D^2 \text{sinc}^2(mD), & m = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (9)$$

为了增大衍射效率,采用正 1 级的衍射级次,占空比选择为 0.5,相位深度为 π ,此时衍射效率约为 40.5%,使得干涉仪参考光强与检测光光强的比值约为 1 : 0.16,能够较好地满足干涉仪对条纹对比度

的要求。

3.2 CGH 引入的波前误差

CGH 误差可以分为基底误差和刻蚀误差。

基底误差主要有:基底面形误差、折射率不均匀

性误差以及楔角误差等。实验中选择质量较好的熔石英基板,将基板两个平面的面形误差控制在峰谷(PV)值 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)以内,楔角误差在 $1.5''$ 以内,折射率不均匀性误差在 10^{-6} 以内。此时基板面形误差引入的波前误差占主要影响,约为 20 nm 。

刻蚀误差主要有:刻线位置畸变误差、刻蚀深度不均匀性误差、占空比不均匀性误差、刻蚀表面粗糙度误差等,其中,刻线位置畸变误差占主要影响。刻线位置畸变误差对波前测量的影响可表示为^[14]

$$\Delta W_d = -m\lambda \frac{\Delta d}{d_{\min}}, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (10)$$

式中: Δd 为刻线位置畸变大小; d_{\min} 为最小刻线周期。制作的CGH刻线位置畸变控制在 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 以内,最小刻线周期大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

4 实 验

针对高功率激光驱动装置的大口径非球面透镜

表 1 非球面透镜元件参数

Table 1 Parameters of aspheric lens

| Parameter | Square aperture / (mm×mm) | Curvature radius /mm | Cone coefficient | Two order coefficient / 10^{-10} | Center thickness /mm |
|-----------|---------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------|----------------------|
| Value | 410×410 | -1899.75 | -2.180721 | -4.34 | 65 |

表 2 主全息和辅助全息元件参数

Table 2 Parameter of main and assistant CGHs

| CGH type | Radial coordinate range /mm | Etching depth /nm | Duty-cycle | Diffraction order | Minimal pattern period / μm |
|---------------|-----------------------------|-------------------|------------|-------------------|--|
| Main CGH | 0-32.92 | 692 | 0.5 | +1 | 17.85 |
| Assistant CGH | 36-42 | 70 | 0.5 | +3 | 6.94 |

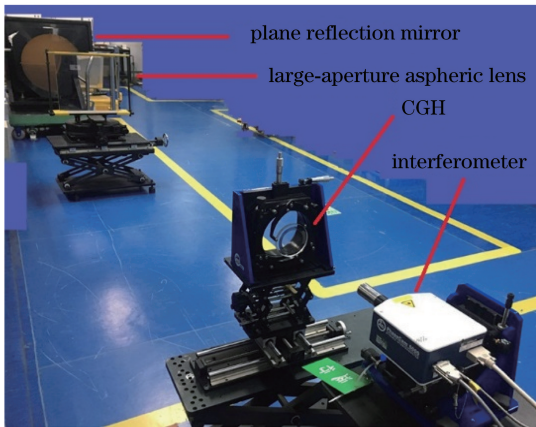


图 5 测量装置光路图

Fig. 5 Optical path photo of measurement installation

检测,设计并制作了CGH。非球面透镜的参数如表1所示。为了对CGH的姿态进行定位,制作了专门的辅助全息。辅助全息的衍射级次被设计为正3级,被刻蚀在与主全息同一端面的玻璃基板上,并在其表面镀铝以增加反射率。辅助全息在功能上相当于凹面反射镜。设计制作的CGH参数如表2所示。对主全息波前误差影响最大的是基底误差与刻蚀畸变误差,基底误差引入的波面误差约 20 nm ,刻蚀畸变误差引入的波面误差约 8.9 nm ,二者综合引入的透射波前误差约 21.9 nm 。辅助全息的波面误差主要由刻蚀畸变误差决定,其引入的波面误差约 136.8 nm 。由于辅助全息只是起到CGH姿态定位的作用,故其对透镜透射波前测量的影响不大。

采用CGH和折射式补偿镜分别对一块非球面透镜进行了测量,所使用的干涉仪为4D公司的动态球面干涉仪,光波波长 λ 为 632.8 nm 。图5为现场测量装置的光路图。

图6是采用CGH作为补偿镜进行测量的结果,非球面透镜的透射波前PV值和均方根(RMS)值分别为 0.325λ 和 0.029λ 。图7是采用折射式补偿镜进行测量的结果,透镜的透射波前PV值和RMS值分别为 0.359λ 和 0.035λ 。两种测量方法的结果不仅分布相似,PV值和RMS值也很接近,PV值的差值为 0.034λ ,RMS值的差值为 0.006λ 。对比测试表明:CGH作为相位补偿元件具有相当高的测试精度。

由图6可以发现,波前分布的中央区域存在同心圆环,这是其他衍射级次的光束参与干涉造成的影响。由于同心圆环的起伏较小,其对测量结果影响较小。

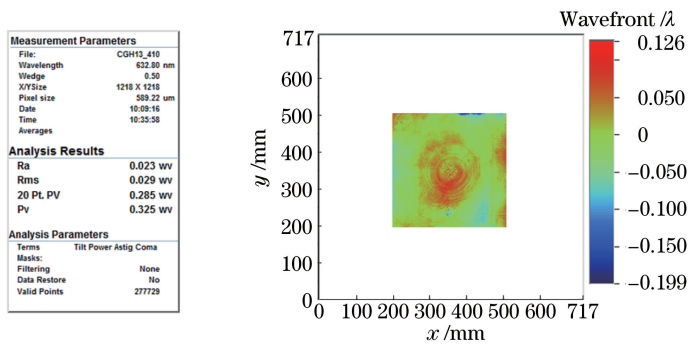


图 6 CGH 作为补偿镜检测结果

Fig. 6 Measured transmission wavefront by using a CGH as a phase compensation element

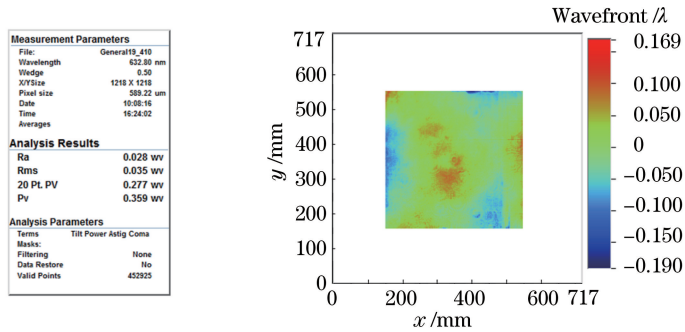


图 7 折射式补偿镜检测结果

Fig. 7 Measured transmission wavefront by using a refractive compensation lens as a phase compensation element

5 结 论

针对高功率激光驱动装置中的非球面透镜,提出了采用 CGH 作为相位补偿元件的零位检测方法。将所设计制作的 CGH 用作相位补偿元件来检测非球面透镜,并与传统的折射式补偿元件检测方法进行对比测试。测试结果表明:两种方法检测的数据具有良好的一致性,基于 CGH 作为相位补偿元件的测试方法具有很高的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [2] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the national ignition facility [J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.
- [3] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [4] Gao S T, Sui Y X, Yang H J. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612003.
- [5] Arnold S M. How to test an asphere with a computer generated hologram[J]. Proceedings of SPIE, 1989, 1052: 191-197.
- [6] Lindlein N. Analysis of the disturbing diffraction orders of computer-generated holograms used for testing optical aspherics[J]. Applied Optics, 2001, 40(16): 2698-2708.
- [7] Zhao C, Zehnder R, Burge J H, *et al.* Testing an off-axis parabola with a CGH and a spherical mirror as null lens[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5869: 586911.
- [8] Kim T, Burge J H, Lee Y, *et al.* Null test for a highly paraboloidal mirror [J]. Applied Optics, 2004, 43(18): 3614-3618.
- [9] Dubin M B, Su P, Burge J H. Fizeau interferometer with spherical reference and CGH correction for measuring large convex aspheres[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7426: 74260S.
- [10] Burge J H, Zhao C, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction [J]. Proceedings of SPIE,

- 2010, 7739: 773902.
- [11] Talha M M, Chang J, Wang Y, *et al.* Computer generated hologram null compensator for optical metrology of a freeform surface [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(24): 2262-2265.
- [12] Martin H M, Angel J R P, Angeli G Z, *et al.* Manufacture and final tests of the LSST monolithic primary/tertiary mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9912: 99120X.
- [13] 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.
- [14] Zhou P, Burge J H. Optimal design of computer-generated holograms to minimize sensitivity to fabrication errors [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15410-15417.
- [15] Zhao L B, Zhang Z Y, Zhu D Y, *et al.* Fabrication of high precision computer generated hologram for aspheric surface testing by laser-direct writing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110902.
- 赵龙波, 张志宇, 朱德燕, 等. 用于非球面检验的激光直写高精度计算全息图制作 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110902.
- [16] Dou J T, Gao Z S, Yang Z M, *et al.* Deep aspheric surface test based on combination of computer generated holograms with low spatial frequency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1112004.
- 窦健泰, 高志山, 杨忠明, 等. 低空间频率组合计算全息元件检测深度非球面 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1112004.
- [17] Zheng L G, Hao T, Guo C L, *et al.* Phase analysis in computer-generated hologram induced by direct laser writing systems with orthogonality error [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012005.
- 郑立功, 郝腾, 国成立, 等. 激光直写机床系统正交性误差影响下计算全息图相位分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012005.