

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

郑立功¹ 郝 腾^{1,2} 国成立^{1,2} 王若秋^{1,2} 张志宇^{1*}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 计算全息图(CGH)在非球面、自由曲面等光学元件的高精度检测中发挥着重要作用。激光直写机床导轨的正交性误差会影响 CGH 图案的绘制精度,进而在面形检测结果中引入像散误差。为定量研究激光直写机床导轨正交误差对 CGH 检测结果的影响,利用标量衍射理论,建立激光直写机床导轨角度误差模型,以 CGH 对准区域图案为例对机床导轨正交性误差的影响进行分析。实验结果表明在机床导轨正交性误差为 800 μrad 时的均方根(RMS)值、峰谷值(PV)值和 Zernike 像散系数与理论值分别相差 2.26%、2.33%、1.72%,从而验证所建立误差模型的正确性。

关键词 测量; 计算全息图; 激光直写; 标量衍射理论; 对准区域; 正交性误差

中图分类号 O439;O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1012005

Phase Analysis in Computer-Generated Hologram Induced by Direct Laser Writing Systems with Orthogonality Error

Zheng Ligong¹ Hao Teng^{1,2} Guo Chengli^{1,2} Wang Ruoqiu^{1,2} Zhang Zhiyu¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Computer-generated hologram (CGH) plays an important role in testing high-accuracy optical elements such as aspheric and freeform surfaces. However, the orthogonality error induced by the rails of direct laser writing systems will deteriorate the fabrication accuracy of CGH, and thus introduce astigmatism error to the testing results of surface shape. To quantitatively study the influence of orthogonality error induced by the rails of direct laser writing systems on testing results of CGH, a model of rails' angle error of direct laser writing systems using scalar diffraction theory is established, and the impact of orthogonality error on the alignment section of the CGH is analyzed. The experimental results indicate that there is 2.26%, 2.33% and 1.72% deviation in root mean square (RMS), peak valley(PV) and Zernike astigmatic coefficient respectively with theoretical results when orthogonality error is 800 μrad , which verifies the correctness of the established error model.

Key words measurement; computer-generated hologram; direct laser writing; scalar diffraction theory; alignment section; orthogonality error

OCIS codes 120.3940; 120.3180;090.1760; 090.2880

1 引 言

基于计算全息图(CGH)的光学补偿检测,是利用 CGH 作为光学补偿元件,与波面干涉仪相结合的零位、高

收稿日期: 2016-05-19; 收到修改稿日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51305422)、国家 973 计划(2011CB013200)

作者简介: 郑立功(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学系统制造方面的研究。

E-mail: zhenglg@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangzhiyu@ciomp.ac.cn

精度的检测方法,在非球面、自由曲面等光学元件的面形误差检测中发挥着重要作用^[1-4]。例如巨型麦哲伦望远镜(GMT)主镜^[5]、多面镜望远镜(MMT)次镜^[6]等大型光学元件的面形误差检测都使用了高精度的CGH。

CGH的制作过程可以概括为计算机辅助设计、图形绘制和图形转移等步骤。在CGH图形绘制阶段,CGH可用电子束或激光直写方法。电子束直写具有极高的线宽分辨率,但加工效率很低。激光直写是通过激光束高速扫描的方式完成光刻胶层的曝光,具有速度快、精度高等特点,非常适合大口径CGH的加工。在激光直写CGH的理论研究方面,Salgueiro等^[7]利用高斯光束传播理论,建立了激光直写理论模型,分析了离焦量、激光能量等对光刻线宽的影响。浙江大学杨国光等^[8]利用标量衍射理论,对光刻胶表面在激光直写时的光场分布进行了分析。美国亚利桑那大学 Zhou P等^[9-12]基于二元线性光栅模型,分析了相位型CGH的位置误差、占空比误差、刻蚀深度误差等对衍射效率与波前精度的影响,但尚未分析CGH误差在检测系统中的传递。Zhao C Y等^[13]对CGH设计误差、加工误差、基板误差、对准误差等进行了分析,并初步研究了图案绘制阶段的正交性误差给波前带来的影响,但其理论只适用于误差相对于整体形面极小时的情况。德国夫琅禾费研究所的 Stuerwald S等^[14]对CGH检测时的误差补偿进行了研究,但未对单一的误差来源进行分析。

作为一种重要的图案绘制设备,激光直写机床在CGH等二元光学器件的加工中有着重要的应用。由于其系统误差的检测和调整都异常困难,目前国内外学者对图案绘制阶段加工设备的系统误差所造成的影响分析较少,缺乏相应的误差理论研究。

本文基于标量衍射理论,研究激光直写机床系统误差与CGH检测精度之间的定量关系,分析激光直写机床导轨正交性误差对CGH对准区域的影响,并利用实验来验证所提出误差理论模型的正确性,得出机床导轨正交性偏差角与干涉仪检测结果的均方根(RMS)值、峰谷(PV)值和Zernike像散系数正相关的结论。给出了检测机床正交性误差角度的方案,可用于提高激光直写图案的加工精度和发展图案补偿技术。

2 激光直写机床导轨正交性误差对CGH检测区域的影响

2.1 CGH检测基本原理

典型的CGH补偿检测光路如图1所示:从干涉仪球面标准镜发出的球面波,经CGH衍射为与待测物表面设计波前一致的光波,经待测物表面反射后,携带待测表面误差信息返回并被干涉仪检测。根据用途的不同,CGH图案可分为主区域、基准区域和对准区域。CGH的主区域是实现光学补偿检测的区域,其图案根据待检测物体的设计波前而绘制,并引入倾斜项以使各衍射级次分离。基准区域是用于调整CGH与被检物体横向位置的区域,其图案通常经衍射生成点或线段,作为被检物体横向调整的基准,一般不会对干涉仪中得到干涉图案。CGH的对准区域是用于CGH与干涉仪的位置调整,该部分区域将设计衍射级次的反射光沿与入射CGH的波前相同路线返回,干涉仪将返回光与参考光产生干涉,得到干涉条纹,通过CGH位置的调整,获得零条纹状态,从而实现CGH与干涉仪位置的精确对准。其图案通常为圆形菲涅耳波带片结构。由于干涉仪所得到的是相位信息,理想状态下,忽略常数项、孔径限制以及其他衍射级次光波,其工作衍射级次的反射复透射率可表示为:

$$r_{\text{cgh}}(x, y) = \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda f_{\text{cgh}}}(x^2 + y^2)\right], \quad (1)$$

式中 f_{cgh} 为对准区域工作衍射级次的焦距。

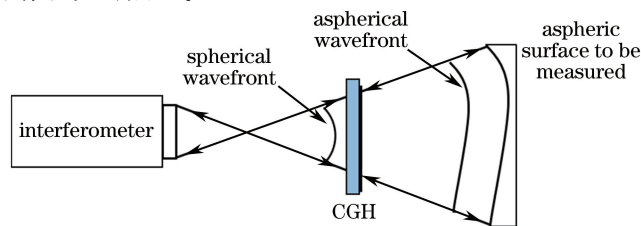


图1 CGH检测非球面光路示意图

Fig. 1 Layout of testing aspheric surface with CGH

2.2 激光直写机床运动误差

所使用的激光直写设备结构如图 2 所示,为 XY2 组相互垂直的导轨所组成的十字正交划面结构。XY 运动平台利用直线电机驱动,并利用干涉仪进行精确位置反馈。其系统运动误差主要来自:导轨倾斜、导轨正交性误差、平台倾斜、导轨定位误差等。激光直写机床的平台倾斜和导轨倾斜误差的检测和消除较为容易。通常用高精度电子水平仪检测得到其倾斜角度,检测精度可达到 $1\ \mu\text{m}/\text{m}$ 量级,并可通过调整支撑结构消除其误差。

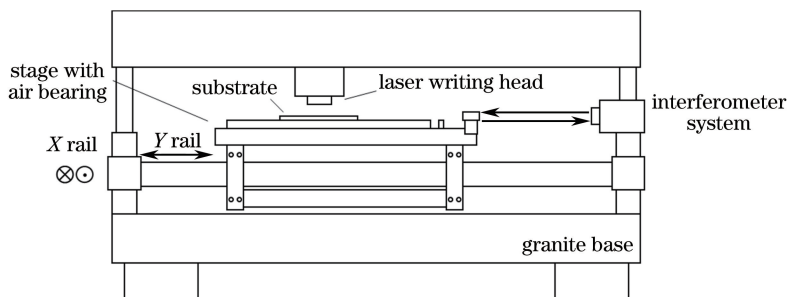


图 2 激光直写机床结构图

Fig. 2 Structure diagram of direct laser writing tool

导轨正交性误差和导轨定位误差的检测和消除较为困难。现有的检测方法均以一轴为基准,通过测量标准物特征点在导轨运动过程中的坐标变换获取其误差值,其检测精度依赖于标准物体的精度。通常导轨定位误差在导轨制造时产生,使用中一般不会发生改变,故在 CGH 加工时导轨定位误差出现概率较小,且目前高精度导轨定位精度可达到 $0.1\ \mu\text{m}/\text{m}$ 量级,基本可以满足 CGH 的制作精度要求。而导轨正交性误差在设备安装、维护和使用时常因元件松动、设备震动等因素发生改变,故可视为影响 CGH 图案绘制精度的主要误差因素。

2.3 导轨正交性对 CGH 图案的影响

如图 3 所示,理想状态下机床导轨相互正交,机床导轨移动的坐标系 xoy 与加工件表面理想坐标系 $x'o'y'$ 相重合。当机床导轨的正交性存在误差时,机床导轨移动的坐标系 xoy 不再正交,机床导轨移动的坐标系 xoy 与理想坐标系 $x'o'y'$ 之间的对应关系为:

$$x' = x + y \cos \theta, \tag{2}$$

$$y' = y \sin \theta, \tag{3}$$

式中 θ 为 x, y 导轨的实际夹角。 α 为机床导轨偏差角,即 y' 轴与 y 轴的夹角。当 y' 可由 y 逆时针旋转得到时, $\theta < \frac{\pi}{2}$, α 为正;当 y' 可由 y 顺时针旋转得到时, $\theta > \frac{\pi}{2}$, α 为负,并有 $\theta + \alpha = \frac{\pi}{2}$ 。

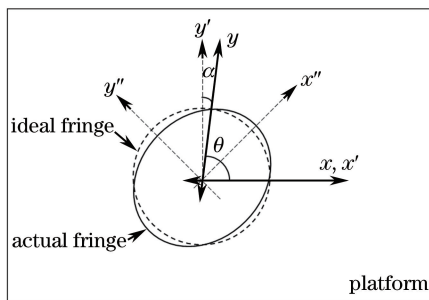


图 3 机床导轨正交性误差

Fig. 3 Orthogonality error of machine tool slide guide

机床导轨误差同时会导致对准区域和主区域图案的形变,以对准区域为例进行分析。在机床导轨误差影响下,对于对准区域任意半径为 t 的圆条纹,其实际加工图形如图 3 实线所示,在 xoy 与 $x'o'y'$ 坐标系下可分别表示为:

$$x^2 + y^2 = x'^2 - 2x'y' \frac{\cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} + \frac{y'^2}{\sin^2 \theta} = t^2, \quad (4)$$

为方便求解,将 $x'oy'$ 沿 z 轴逆时针旋转 $\frac{\theta}{2}$, 建立坐标系 $x''oy''$, 与 $x'oy'$ 有对应关系:

$$x'' = x' \cos \frac{\theta}{2} + y' \sin \frac{\theta}{2}, \quad (5)$$

$$y'' = -x' \sin \frac{\theta}{2} + y' \cos \frac{\theta}{2}, \quad (6)$$

并在坐标系 $x''oy''$ 下,所加工图形表达式为:

$$x^2 + y^2 = \frac{x''^2}{a^2} + \frac{y''^2}{b^2} = t^2, \quad (7)$$

式中

$$a = \sqrt{1 + \cos \theta}, \quad (8)$$

$$b = \sqrt{1 - \cos \theta}, \quad (9)$$

即在激光直写机床导轨存在正交性误差的情况下,对设计半径为 t 的圆环,其实际加工图案为长短轴分别为 at 和 bt 的椭圆。当偏差角 α 为正值时, $\theta < \frac{\pi}{2}$, $a > 1$, $b < 1$, 长轴与 x'' 轴重合,短轴与 y'' 轴重合,长轴与机床导轨 x 轴的夹角为 $\frac{\theta}{2}$ 。当偏差角 α 为负值时, $\theta > \frac{\pi}{2}$, $a < 1$, $b > 1$, 长轴与 y'' 轴重合,短轴与 x'' 轴重合,短轴与机床导轨 x 轴的夹角为 $\frac{\theta}{2}$ 。故对所设计加工图案,在存在机床导轨正交误差的情况下,其条纹变化为:

$$U(x^2 + y^2) \rightarrow U\left(\frac{x''^2}{a^2} + \frac{y''^2}{b^2}\right), \quad (10)$$

忽略常数项变化,由(10)式可推得实际 CGH 的反射率复振幅为:

$$r'_{\text{cgh}}(x'', y'') = \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda f_{\text{cgh}}}\left(\frac{x''^2}{a^2} + \frac{y''^2}{b^2}\right)\right]. \quad (11)$$

2.4 导轨正交性对于实际检测的影响

CGH 对准区域的图案为菲涅耳波带片,其用途是将 CGH 与干涉仪标准镜对准。如图 4 所示,干涉仪所发出的平面波经标准镜产生会聚的球面波后传播经过焦点变为发散的球面波,照射到 CGH 对准区域,并按原路返回,最终以平面波的形式进入干涉仪。其中, f 为干涉仪标准镜焦距, R 为照射到 CGH 表面球面波的半径, d 为干涉仪到 CGH 的距离。根据对准光路设计的位置关系有 $R = 2f_{\text{cgh}}$, $d = f + R$ 。

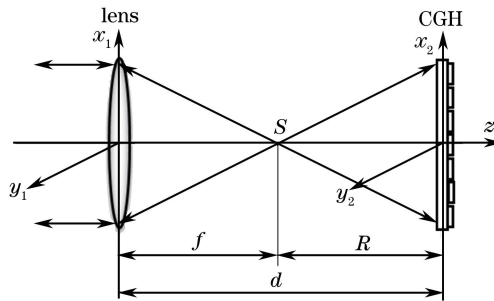


图 4 干涉仪与标准镜对准示意图

Fig. 4 Layout of alignment for interferometer and standard lens

设入射平行光复振幅为 $U_0 = A_0$ 。当 CGH 加工图案无误时,干涉仪发出的平行光经镜头会聚,并经过焦点后成为发散的球面光束,照射到 CGH 上。其入射 CGH 光场复振幅为:

$$U_2(x_2, y_2) = A_0 \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda R}(x_2^2 + y_2^2)\right], \quad (12)$$

式中 A_0 为光场振幅。将(1)式代入,得到 CGH 反射光复振幅为:

$$U_3(x_2, y_2) = U_2(x_2, y_2) \cdot r_{\text{cgh}}(x_2, y_2) = A_0 \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda R}(x_2^2 + y_2^2)\right], \quad (13)$$

即在正常情况下经 CGH 和干涉仪标准镜后,仍为平行光反射回干涉仪中。

当 CGH 图案存在激光直写机床正交性所导致的加工误差时,将(10)式代入,得到 CGH 的实际反射光复振幅为:

$$U_3(x''_2, y''_2) = A_0 U_2(x''_2, y''_2) \cdot r'_{\text{cgh}}(x''_2, y''_2) = A_0 \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda(d-f)}(x''_2{}^2 + y''_2{}^2)\right] \exp\left[-\frac{j2\pi}{\lambda R}\left(\frac{x''_2{}^2}{a^2} + \frac{y''_2{}^2}{b^2}\right)\right] = A_0 \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda A}x''_2{}^2 - \frac{j\pi}{\lambda B}y''_2{}^2\right], \quad (14)$$

式中 A, B 分别满足:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{d-f} - \frac{2}{a^2(d-f)}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{d-f} - \frac{2}{b^2(d-f)}. \quad (16)$$

利用菲涅耳衍射近似,并忽略常数项在光波传播中的变化,可得到达标准镜后表面的光场复振幅为:

$$U_4(x''_1, y''_1) = A_0 \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda}\left(\frac{x''_1{}^2}{A+d} + \frac{y''_1{}^2}{B+d}\right)\right], \quad (17)$$

由于干涉仪标准镜为回转体结构,将坐标旋转后其表达式不变,其复振幅透射率可表示为:

$$t_{\text{lens}}(x'_1, y'_1) = t_{\text{lens}}(x''_1, y''_1) = A_0 \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(x''_1{}^2 + y''_1{}^2)\right], \quad (18)$$

经标准镜最终返回至干涉仪的复振幅信息为:

$$U_5(x''_1, y''_1) = U_4(x''_1, y''_1) \cdot t_{\text{lens}}(x''_1, y''_1) = A_0 \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{A+d}\right)x''_1{}^2 - \frac{j\pi}{\lambda}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{B+d}\right)y''_1{}^2\right], \quad (19)$$

由于干涉仪所获取的是相位信息,由(19)式可得其相位表达式:

$$\varphi(x'', y'') = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{A+d} - \frac{1}{f}\right)x''^2 + \frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{B+d} - \frac{1}{f}\right)y''^2, \quad (20)$$

对于主区域,可依靠该标量衍射理论对干涉仪出射平行光束经标准镜、CGH 到达物体表面后反射再次经 CGH、标准镜后进入干涉仪等 4 次传递后的光场进行分析,得到干涉仪所获取的相位信息。

3 计算机模拟结果

将(8)、(9)、(15)、(16)式代入(20)式中,可以得到机床导轨偏差角 α 与干涉仪所得相位的关系。通过 Matlab 进行仿真可得到:在干涉仪镜头焦距 $f = 330 \text{ mm}$, 波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, CGH 设计焦距 $f_{\text{cgh}} = 250 \text{ mm}$, 对准区域形状为直径 $\Phi = 50 \text{ mm}$ 的圆形条件下,机床偏差角 $\alpha = 800 \mu\text{rad}$ 时干涉仪所得相位图如

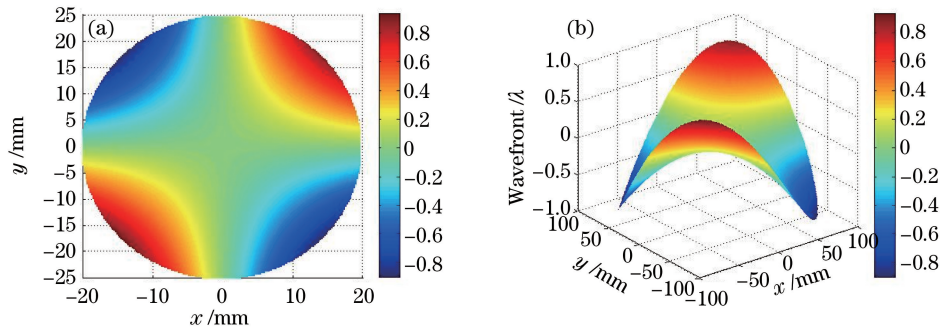


图 5 干涉仪所得相位图。(a) 二维; (b) 三维

Fig. 5 Phase maps of interferometer. (a) Two dimension; (d) three dimension

图 5 所示;机床偏差角 α 与 PV 值、RMS 值、Zernike 像散系数间关系如图 6、图 7、图 8 所示。

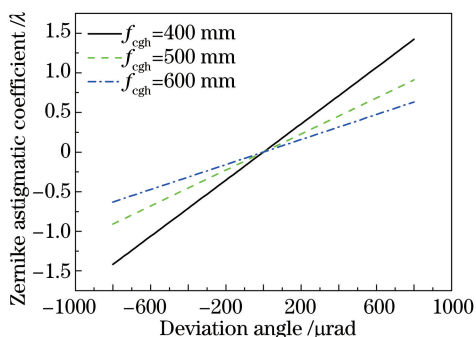


图 6 偏差角与 Zernike 像散系数关系图

Fig. 6 Relationship between Zernike astigmatic coefficient and deviation angle

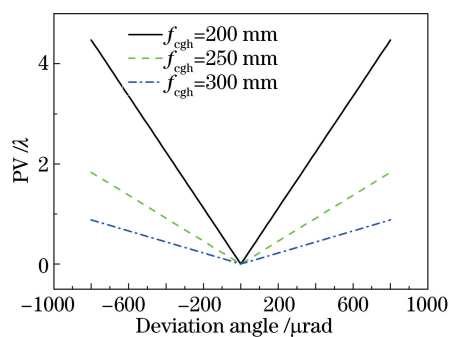


图 7 偏差角与 PV 值关系图

Fig. 7 Relationship between PV and deviation angle

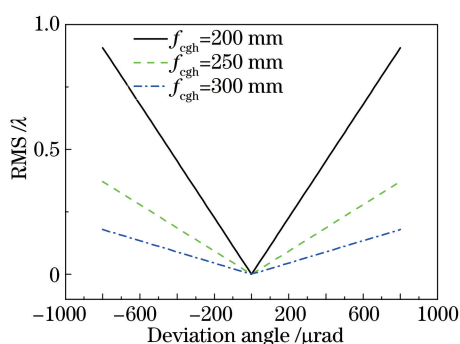


图 8 偏差角与 RMS 关系图

Fig. 8 Relationship between RMS and deviation angle

根据模拟结果可知,激光直写机床正交偏差角较小时,干涉仪所得结果近似为 45° Zernike 像散,且偏差角 α 与 Zernike 像散系数线性相关,其绝对值与 PV 值、RMS 值线性相关。通过该结论,利用(19)式,在已知光路设计参数的情况下,可以根据像散系数、RMS 值、PV 值等参数计算激光直写机床导轨误差偏角,同时根据其线性特性,可在检测结果中对机床导轨所引入的检测误差进行补偿。此外,在图案设计时对相应坐标拉伸和缩放、增大 CGH 焦距,也可以补偿或减少机床导轨误差。

4 误差验证实验

为验证激光直写误差理论的正确性,搭建实验检测光路进行验证。由于人工设置机床导轨偏差角 α 困难,且会给激光直写机床带来不必要的误差。故本实验采用在振幅型 CGH 图案上设计导轨偏差角的方式进行模拟实验。检测光路如图 4 所示,干涉仪波长 $\lambda=632.8$ nm,选用常见的 $F=3.3$ 的标准镜。CGH 如图 9 所示,选用直径为 80 mm 的基板,中心为主区域,直径为 50 mm,1 级衍射光焦距为 250 mm,设计偏差角为 $800 \mu\text{rad}$,外环为对准区域,1 级衍射光焦距为 250 mm,不设计偏差角。激光直写机床为德国 Heidelberg 公司的 DWL4000 型激光直写系统。

检测所得图像如图 10(a)所示。提取对准区域与主区域干涉测量结果中前 9 项 Zernike 系数,并同时对其归一化处理。利用对准区域干涉结果获取机床及基板误差,并根据此结果对主区域干涉结果进行补偿。

为实现与理想结果的精确对比,提取对准区域补偿主区域前 9 项 Zernike 系数并利用 Metropro 对其进行重建。经重建后,主区域补偿前后主图像分别如图 10(b)、(c)所示。其中经补偿后检测图像细节与图 5(a)无明显差异。检测数据与理论数据如表 1 所示,其 RMS 值、PV 值、Zernike 像散系数值与理论值相差分别为 2.26%、2.33%、1.72%。

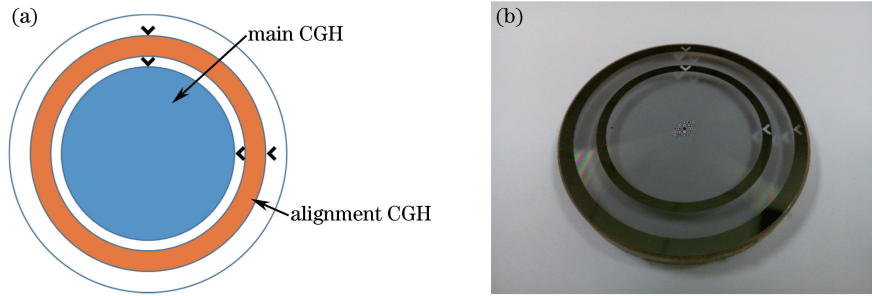


图 9 CGH 的 (a) 衍射区域分布和 (b) 实物图片

Fig. 9 (a) Distribution of diffraction section and (b) photo of CGH

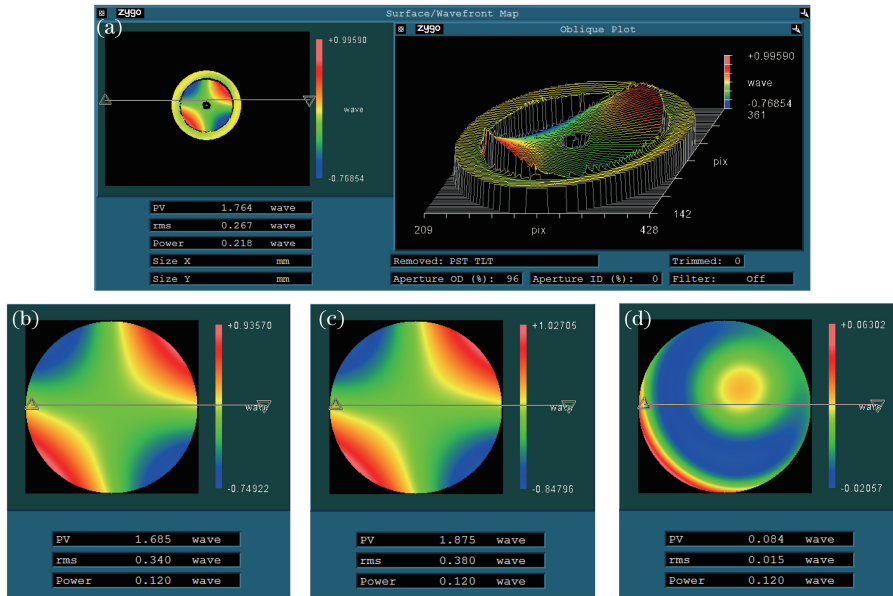


图 10 检测结果。(a) 干涉仪检测结果；(b) 主区域重建结果；(c) 经补偿后主区域重建结果；(d) 经补偿后主区域与理论值比对结果

Fig. 10 Test results. (a) Test result of interferometer; (b) reestablishment result of main area; (c) reestablishment result of main area after compensation; (d) comparison of main area after compensation and theoretical data

表 1 检测数据与理论数据比对结果

Table 1 Comparison between theoretical data and test data

Errors of CGH	Theoretical data / λ	Test data / λ	Deviation /%
RMS	0.371	0.380	2.26
PV	1.832	1.875	2.33
Zernike astigmatic coefficient	0.910	0.926	1.72

为降低机床正交误差对检测结果的影响,根据理论机床误差结果,对图 10(c)进行补偿,补偿后结果如图 10(d)所示。该结果中 RMS 值优于 $\lambda/60$,像散得到了有效的抑制。除像散项外,影响该检测结果的因素为球差、彗差等高阶项,主要来自于基板误差和装调误差。以上实验结果表明,利用标量衍射理论的导轨正交性误差对 CGH 检测误差影响分析理论成立。同时,通过在检测结果中对机床正交误差导致的像散误差进行补偿,可以有效地降低检测误差。

5 结 论

由于精度高、易加工,CGH 在非球面、自由曲面等表面高精度检测中有着广泛的应用。当使用激光直写机床加工 CGH 时,导轨正交性误差会影响 CGH 图案的绘制精度,进而给面形检测引入像散误差。利用标量衍射理论,推导出机床误差偏角与干涉仪检测结果(PV 值、RMS 值、Zernike 像散系数)之间的关系,并提

出激光直写机床正交性误差的补偿方案。设计并加工了具有 $800\ \mu\text{rad}$ 导轨正交性误差的 CGH, 定量分析了机床正交性误差对 CGH 检测结果的影响。检测结果表明, 该 CGH 的 RMS 值、PV 值和 Zernike 像散系数与理论值相差分别为 2.26%、2.33%、1.72%, 补偿后精度达到 $\lambda/60$ (RMS 值)。该结果验证了上述模型的正确性, 可用于指导对准区域、主区域检测误差分析, 提高 CGH 补偿检测的精度。

参 考 文 献

- 1 Wyant J C, Bennett V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. *Appl Opt*, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 2 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated-hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- 3 Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, *et al.* Optical testing method and its experiment on freedom surface with computer-generated hologram[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1052-1056.
黎发志, 郑立功, 闫峰, 等. 自由曲面的 CGH 光学检测方法与实验[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 1052-1056.
- 4 Zhu Deyan, Zhang Xuejun. Design of high-precision phase computer-generated-hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0712002.
朱德燕, 张学军. 高精度位相型计算全息图的设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0712002.
- 5 Burge J H, Kot LB, Martin H M, *et al.* Alternate surface measurements for GMT primary mirror segments[C]. SPIE, 2006, 6273: 62732T.
- 6 Martin H M, Burge J H, Vecchio C D, *et al.* Optical fabrication of the MMT adaptive secondary mirror[C]. SPIE, 2000, 4007: 502-507.
- 7 Salgueiro J R, Moreno V, Linares J. Model of linewidth for laser writing on a photoresist[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(5): 895-901.
- 8 Yang G G, Shen Y B. Laser direct writing system and its lithography properties[C]. SPIE, 1998, 3550: 409-418.
- 9 Cai W R, Zhou P, Zhao C Y, *et al.* The diffraction optics calibrator: design and construction[J]. *Opt Eng*, 2013, 8839: 883907.
- 10 Zhou P, Burge J. Coupling of surface roughness to the performance of computer-generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(26): 6572-6576.
- 11 Zhou P, Burge J H. Optimal design of computer-generated holograms to minimize sensitivity to fabrication errors[J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15410-15417.
- 12 Chang Y C, Zhou P, Burge J H. Analysis of phase sensitivity for binary computer-generated holograms[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(18): 4223-4234.
- 13 Zhao C Y, Burge J H. Optical testing with computer generated holograms: comprehensive error analysis[C]. SPIE, 2013, 8838: 88380H.
- 14 Stuerwald S. Error compensation in computer generated hologram-based form testing of aspheres[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(35): 8249-8255.