

基于计算全息的光学自由曲面测量不确定度分析

黄 亚 马 骏* 朱日宏 沈 华 高志山

南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094

摘要 光学自由曲面元件如离轴非球面等在现代光学系统中起到了越来越重要的作用。计算全息元件(CGH)可产生任意形状的波前,能够很好地应用在光学自由曲面的零位补偿干涉测量中。针对一离轴椭球面为测量样品,以光学计量领域比较成熟的 Offner 补偿器法,测量离轴非球面母镜的面形偏差,进而获得离轴椭球面的面形偏差;再将离轴椭球面通过旋转平移,作为自由曲面元件,在平面基板上设计 CGH 对其进行零位补偿测量,研究零位补偿 CGH 的误差传递数据。通过主要原理误差分析与计算,在光学熔石英平面基底上制作零位补偿 CGH,测量不确定度达到 $\lambda/10$ [峰谷(PV)值, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$],满足光学自由曲面元件的高精度检测要求。

关键词 测量;计算全息;光学自由曲面;离轴非球面;Offner补偿器

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1112007

Investigation of Measurement Uncertainty of Optical Freeform Surface Based on Computer-Generated Hologram

Huang Ya Ma Jun Zhu Rihong Shen Hua Gao Zhishan

Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Optical freeform surface acts an important role in modern optical system. Computer generated hologram which can generate arbitrary wavefronts shows great advantages in the null test of optical freeform surfaces. According to an off-axis aspheric surface, the surface shape deviation can be gotten by testing the initial aspheric surface with Offner compensator. The off-axis aspheric surface lacks of symmetry can be regarded as freeform surface by rotation and translation in the optical path, and a CGH null compensator is designed on flat substrate to achieve null test of the freeform surface. With calculation and analysis of the main errors in the CGH null test, the measurement uncertainty of freeform surface test can reach $\lambda/10$ [peak-valley(PV) value] level. CGH compensator can be used in the high precision test of freeform surface.

Key words measurement; computer generated hologram; optical freeform surface; off-axis aspheric surface; Offner compensator

OCIS codes 120.6650; 220.1250; 120.3180; 120.3940; 080.4228

1 引 言

光学自由曲面没有统一的对称轴,不满足旋转对称性。光学自由曲面相较非球面而言,在光学设计中具有更大的自由度,可以在达到设计要求的前提下尽可能地简化系统结构,减小光学系统体积,达到小型化的目的^[1-2]。

光学自由曲面目前仍没有系统的、成熟的检测方法,大部分方法都是从非球面光学元件的检测方法扩展而来^[3]。三坐标测量机法^[4]、轮廓仪法^[5]和相位恢复法^[6-7]、相位测量偏折法^[8],都可应用在光学自由曲面的测量中,但前两者为接触式测量,后两者测量精度有限。美国 Arizona 大学提出的 SCOTS 法^[9]在深度非球面的

收稿日期: 2015-05-11; 收到修改稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(U1231112, 61205162, 61308076)、江苏省自然科学基金(BK2012802)

作者简介: 黄 亚(1988—),男,博士研究生,主要从事光学干涉测试方面的研究。E-mail: huangya18@gmail.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学干涉测量与光学精密仪器等方面的研究。

E-mail: zhurihong@njjust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: majun@njjust.edu.cn

测量中具有较高的精度,但对光学自由曲面面形的检测适应性研究仍未展开。德国 Stuttgart 大学提出的 TWI^[10]理论上能够对各种梯度变化的自由曲面进行局部补偿检测,南京理工大学也在进行该方面的研究^[11],但该方法早期是针对非球面检测提出的,应用在光学自由曲面的测量中还有诸多问题有待解决。

零位补偿测试法是光学元件面形测量精度最高的方法,通过引入各种补偿器,如 CGH、Offner 补偿器等,对测件进行梯度补偿达到零位干涉测量的目的^[12-15]。CGH 器件是一种二元光学衍射元件,可以生成任意形状的自由波前,使得其非常适合于光学自由曲面的零位干涉测量。CGH 器件主要应用在小梯度变化的常规非球面的面形检测中,近年来也逐渐应用在一些小梯度变化的光学自由曲面的检测过程中^[16-20];但当待补偿的自由曲面表面梯度变化很大的时候,CGH 面上需要补偿的空间相位空间频率很高,超出 CGH 制作设备的加工范围,无法加工或者加工误差很大,无法应用在光学检测中。CGH 方法是一种一对一的检测方法,虽然测量通用性差,但在对面形要求较高的光学面形的检测中这种检测方式正体现了检测结果的可靠性。

离轴非球面元件较于标准球面的偏差已经不再具有旋转对称性,在光学领域内也常将其视为光学自由曲面,但仍可将其看作非球面母镜的一部分进行检测。为分析 CGH 法在光学自由曲面测量中的测量不确定度,同时与成熟的检测手段进行对比,验证 CGH 法的测量精度,本文以一不具有旋转对称性的离轴非球面作为光学自由曲面测试对象,研究针对光学自由曲面的零位补偿 CGH 的设计和检测方法,比较研究了 CGH 器件零位补偿法和 Offner 补偿器法两种方法的测量结果,分析 CGH 器件在光学自由曲面测量中的测量不确定度。

2 原 理

2.1 测量方案

离轴非球面元件经过旋转平移作为在轴元件进行零位干涉检测时,补偿器件需要补偿的表面梯度变化已经不具有旋转对称性,在光学检测中可以将离轴非球面视为光学自由曲面。而离轴非球面作为非球面母镜的一部分,针对非球面母镜的检测手段如 Offner 补偿器法已经很成熟,可实现大口径凹非球面光学元件的高精度检测,其精度可达约 $\lambda/100$,其测量结果常常作为非球面面形检测的标准。因此可将针对离轴非球面的 CGH 零位补偿法和针对非球面的 Offner 补偿器法的检测结果做对比,验证 CGH 法检测光学自由曲面的测试精度。

CGH 零位干涉检测方法中,采用将一离轴非球面元件通过在光路中的旋转平移并将其作为在轴光学自由曲面,在光学熔石英平面基底上设计制作相应的二元相位补偿器件对其进行零位干涉测量。光路原路如图 1 所示。图中光路为典型的斐索光路,待测光学自由曲面放置在测试臂上,由斐索干涉仪出来的准直光束,经标准补偿参考透镜的末球面时一部分透过,一部分反射,反射光作为参考光,透射光透过相位型 CGH,经 CGH 调制后产生可补偿待测光学自由曲面的一级衍射光沿待测自由曲面的法向方向正入射,并经待测自由曲面反射,原路返回,作为测试光与参考光进行干涉,干涉图中携带了待测自由曲面的面形偏差信息,通过移相干涉术对参考光与测试光干涉得到的干涉图信息进行解读,即可得到待测自由曲面相对于由 CGH 产生的理想自由曲面波前的面形偏差信息。

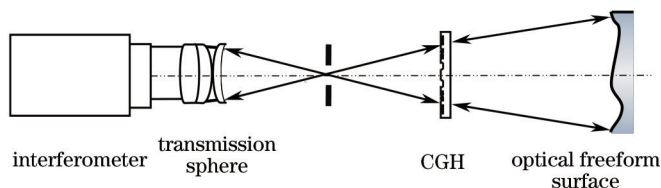


图 1 基于 CGH 的光学自由曲面零位补偿干涉测量光路图

Fig.1 Layout of optical freeform surface testing with CGH null compensator

基于 Offner 补偿器^[21-22]的零位补偿干涉法测量光路如图 2 所示。Offner 补偿镜是由两片或多片透镜组合而成,包含补偿镜和场镜两部分。补偿镜将点光源成像到被测非球面的顶点曲率中心,场镜再把补偿镜成像到被测面上。该透镜组将入射波前转换成被测非球面的理想表面形状,通过分析干涉图样从而得到被测非球面的面形误差。为验证基于 CGH 的零位补偿法对光学自由曲面的测量精度,针对待测自由曲面的非球面母镜设计 Offner 补偿器,从而对离轴非球面的母镜整体进行检测,并选取待测有效区域获得待测自由曲面的面形偏差。

经过以上两种测量光路,测量同一待测件,可以研究分析 CGH 补偿器件在光学自由曲面测量之间的测

量不确定度,论证CGH产生高质量光学自由曲面波前基准,实现光学自由曲面高精度检测的可能性。

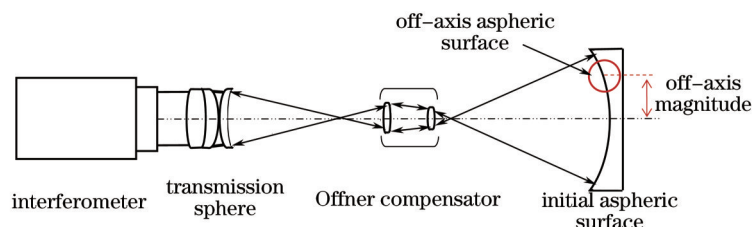


图2 Offner补偿镜零位测量光路图

Fig.2 Layout of aspheric surface testing with Offner compensator

2.2 CGH 元件设计与制作

干涉计量测试系统中光学元件都要求较高的光学质量,对材料与加工提出特殊要求。计算全息应用在光学自由曲面测量过程中,常按照加工工艺及所需级次衍射效率高,分为振幅型CGH和纯相位型CGH两大类。CGH元件对基底材料折射率均匀性、结石等影响波前透过质量的参数有相当高的要求。应用在光学计量领域,CGH器件的基底材料常选择光学熔石英材料,具有较高的折射率均匀性和很低的温度系数。

相位型CGH全器件均为单一介质材料,如熔石英,通过微细加工设备及系列工艺组合加工成单台阶二元光栅结构,相比于振幅型CGH,其衍射效率更高,应用范围更广。其微观结构如图3所示。其中 a 、 b 分别为高低台阶宽度, s 为光栅常数, d 为相位调制深度。相位调制深度 d 与相位调制量 φ 的关系如(1)式所示。当 $\varphi = \pi$ 时,一级衍射效率最佳,可以达到40.5%。此时相位调制深度为 $0.692 \mu\text{m}$ (工作于 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 波长)。

$$\varphi = d \cdot (n - 1) \cdot k, (k = \frac{2\pi}{\lambda}). \quad (1)$$

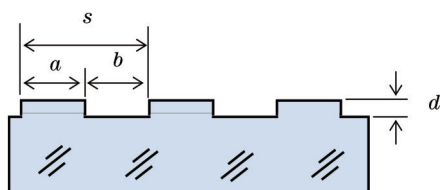


图3 相位型CGH局部结构示意图

Fig.3 Local structure diagram of phase type CGH

CGH设计过程中,首先从待测光学自由曲面参数出发,通过分析待测件的参数,选择合适的前置标准球面镜头,减少CGH器件承担的光焦度,从而降低CGH的刻线空间频率,节约器件加工成本。如何选取前置标准球面镜头,需要根据待测自由曲面的最佳拟合球面及CGH自身辅助装调敏感度是否能够满足测试系统中CGH位置公差进行判断。

前置标准球面镜头选择完成后,将构建如图1所示的零位补偿干涉测量光学自由曲面的初始结构光路。通过采用逆向光线追迹求解设计法,由待测自由曲面为出发点,在确定CGH元件及待测件位置后,以局部法向入射为条件,逆向追迹CGH面上离散点位置的相位值,从而得到在既定位置关系下CGH局部相位的最优解。在这个过程中,其中一个重要参数就是CGH所处的空间位置。当CGH位于不同径向或轴向位置时,设计出的CGH将具有不同的局部空间刻线频率分布,以及不同大小的有效口径。

CGH位置的确定是整个CGH设计中的关键之所在。设计时,需要结合三点要素综合优化考虑,即:1) CGH装调敏感度;2)“鬼像”干扰;3) CGH的加工能力。通过循环优化确定系统的结构参数,并由此计算CGH的相位函数。在优化CGH刻线空间频率的过程中,并不能只遵循“最低原则”,即并不是刻线空间频率越低越有利。在针对与球面仅有小量偏离的待测自由曲面检验系统设计中,过低的空间频率会造成CGH多级衍射之间分离不够的问题。这样的情况,表现在最终的干涉图上,会产生“鬼像”,造成无法判读所需级次的干涉图。为了避免“鬼像”的干扰,在处理过低空间频率的CGH时,会额外地加入一些同轴载频,使CGH偏离原位置以加高自身刻线空间频率。这样从CGH出射的多级次衍射之间将得到更加有效的空间分离,抑制“鬼像”,但在中心区域可能会出现多级级次叠加,造成中间区域无法测量。或者也可以在CGH相位中叠加倾斜载频分量,可以有效地实现多级衍射干扰光线在垂轴上分离,能够彻底消除“鬼像”干扰。但叠加载

频需要控制在一定范围,否则过高的空间频率会加大对加工的要求(图形畸变误差)。同时过高的空间频率也会加大出射波面对装调的敏感度,给实验操作增添麻烦。

同时,由于自由曲面面形复杂,其测试精度同系统中各个器件的位置装调精度关系更为紧密,尤其是CGH的位置调整更为重要。在设计时,还可充分利用CGH器件具有分区设计、编码、制作的特点,设计辅助对准区域,满足器件在光路中的定位、补偿精度要求。采用的分区设计方案如图4所示,(a)为CGH的版图设计文件,(b)为加工好的CGH实物图。图4中,补偿区域位于CGH器件的中央区域,用于待测光学自由曲面的零位补偿;边缘扇形环带区域为辅助对准区域,用于CGH和待测件的辅助定位。正上方每隔120°的环带为CGH器件的定位调整辅助对准区域,由标准球面透镜出射的会聚光束的边缘部分入射到该区域时,会原路返回,通过与参考光的干涉图即可调整CGH在光路中的位置。辅助对准区域旁边的环带为待测件的基准区域,用于将会聚光束的边缘部分聚焦到待测件的顶点,返回光束形成的干涉图,用于指示待测件的定位情况。

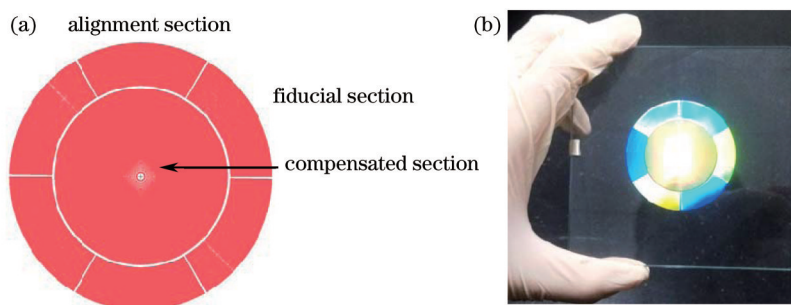


图4 CGH器件分区版图及实物图。(a) CGH加工版图分区;(b) CGH实物图

Fig.4 Layout of CGH with different sections and CGH physical map. (a) Layout of CGH with different sections; (b) physical map of CGH

CGH器件的补偿区域的相位函数采用对光线逆向追迹得到的CGH离散相位进行非均匀有理B样条(NURBS)曲面拟合得到,是一种参数表示函数形式。针对CGH的相位函数,采用三次有理B样条进行拟合,该拟合方法只有三次的多项式,阶次低,计算量少,计算稳定,除可以保证拟合曲面二次连续,能抑制非节点的脉动现象等优点外,还能根据实际情况优化采样点数量,提高计算效率。三次B样条曲面拟合采用三次B样条函数进行曲面拟合,使拟合曲面通过所有数据点。首先通过反算,将数据点坐标 $\{Q_{i,j}\}_{n \times m}$ 转换为控制顶点坐标 $\{P_{i,j}\}_{(n+2) \times (m+2)}$,由控制点生成的B样条拟合曲面可通过所有数据点。针对补偿自由曲面梯度变化的CGH的离散相位拟合过程,如果自由曲面梯度变化较缓,CGH的相位变化也不是特别剧烈的情况下,可以考虑采用三次均匀B样条进行拟合,其数据计算相对简单。但如果自由曲面的面形复杂,则对CGH需要补偿的相位变化也相对复杂,在实际采样过程中,就需要某一部分的采样密一些,另一些部分采样疏一点,具体情况需要根据CGH的相位梯度变化判断。这种情况下采样得到的数据点就不是均匀的。对应的节点参数 $\Delta i = u_i + 1 - u_i$ 不是常数,对应的即为非均匀三次B样条。

实际测试过程中,待测光学自由曲面为顶点曲率半径 $r=-500$ mm、离轴量 $b=80$ mm、圆锥系数 $K=-0.25$ 、口径 $D=64$ mm的离轴椭球面元件。经过旋转平移做在轴检测时,其与最佳拟合球面的偏离即非球面度^[23]通过计算如图5所示,可看出其与球面的偏差为一个马鞍面,已经不具有旋转对称性,在光学检测中可以认为是一个光学自由曲面。

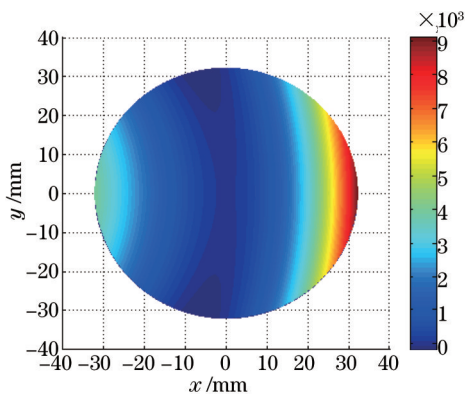


图5 待测自由曲面非球面度

Fig.5 Asphericity of the optical freeform surface

对补偿自由曲面梯度变化的CGH的离散相位进行拟合。通过三维光线追迹得到的离散相位值其分布如图6(a)所示,为了避免CGH相位空间频率过低造成的衍射级次无法有效分离,在设计中增加了同轴载频。对离散相位进行NURBS曲面拟合^[24],得到的CGH面上的连续分布相位函数,该连续分布函数能保证拟合曲面经过所有数据点,拟合后的连续相位分布函数如图6(b)所示。对拟合后的连续分布相位函数按照原始采样点采样顺序重新进行插值计算,得到的相位残差如图6(c)所示,它与原始离散数据结果相差在 10^{-12} 量级,可以忽略不计。

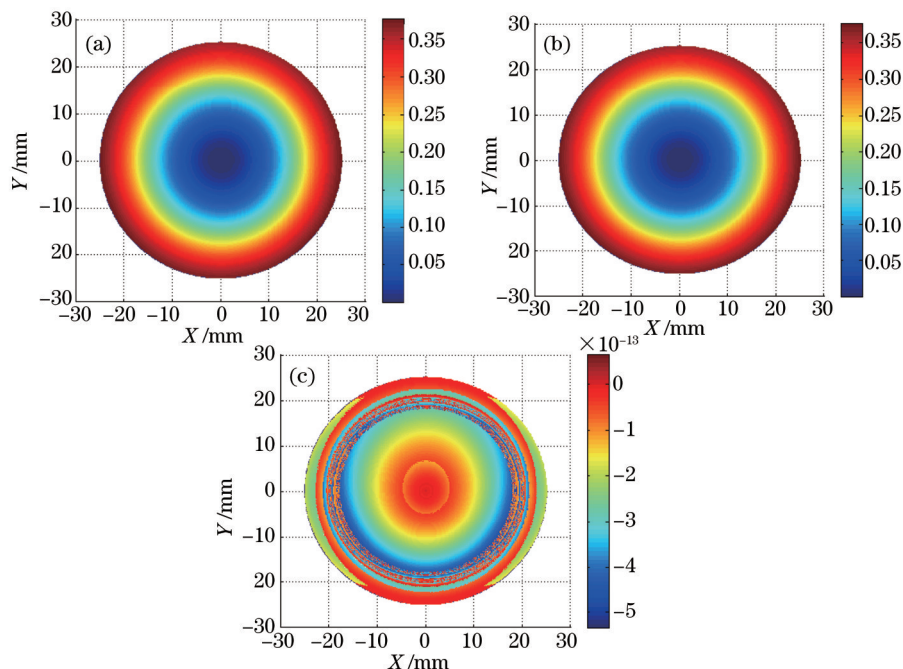


图6 补偿自由曲面梯度变化的CGH离散相位NURBS曲面拟合及残差。(a) 光线追迹得到的CGH面离散相位值;
(b) 经NURBS拟合得到的连续相位函数;(c) 拟合残差

Fig.6 Phase function fitted by NURBS fitting from discrete phase data in CGH surface. (a) Discrete phase data calculated by ray tracing; (b) phase function fitted by NURBS fitting; (c) fitting residual error

在Zemax中通过自定义面型技术定义上述的NURBS型CGH相位面,经过仿真后得到的设计残差如图7所示,残差优于 $10^{-4}\lambda$ [均方根(RMS)值]。

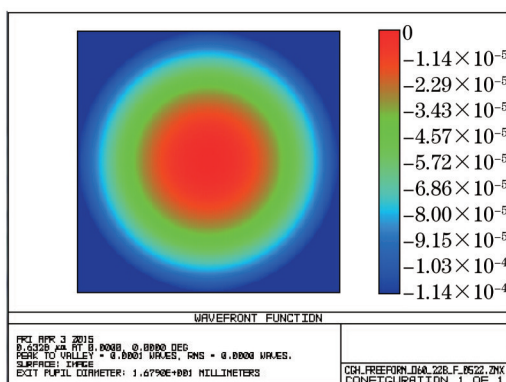


图7 CGH检测光学自由曲面设计残差

Fig.7 Design error of freeform surface test with CGH

以上设计结果经编码后,经光刻成相位型器件,要求相位刻蚀深度为690nm。加工完成的CGH器件实物图见图4(b),其表面微观二元特征经WYKO白光轮廓仪检测结果如图8所示,刻蚀深度约为684 nm,二元特征满足设计要求。

CGH在重构自由曲面波前中引入的误差主要由设计误差、图形刻写误差、基底误差、编码误差、CGH定位误差等组成,具体分布如表1所示,PV为峰谷值。

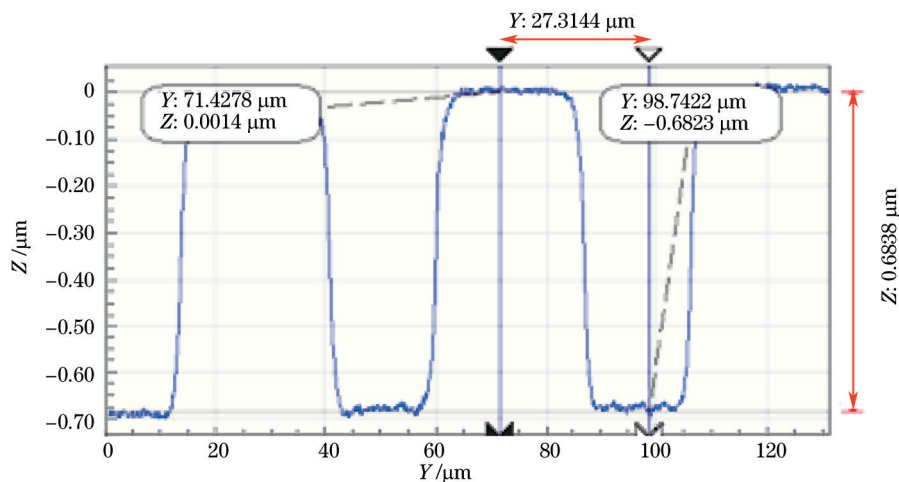


图 8 CGH 微观结构白光轮廓仪结果

Fig.8 Microscopic structure of CGH by WYKO optical profiler

表 1 CGH 重构波前误差($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Table 1 Reconstruction wavefront errors by CGH ($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Error type	Wavefront errors (PV)/ λ
Design error	0
Patterning error	0.012
Substrate surface shape	0.05
Encoding error	0.036
CGH location error	0.01
Reconstruction wavefront errors	0.063

CGH 加工过程中,不可避免地引入图形刻写偏差,由此造成的出射波前的局部相位畸变 W_{PE} 正比于偏差量 $\zeta(x,y)$ 、工作波长 λ 、衍射级次 m 及局部空间频率 $\nu(x,y)$ ^[12],如(2)式所示:

$$W_{PE} = -m\lambda\zeta(x,y)\nu(x,y). \quad (2)$$

CGH 加工设备其定位精度通常在 $0.1\ \mu\text{m}$,本文中加工的 CGH 工作在 -1 级次,最大空间频率约为 $120\ \text{lp/mm}$,由此引入的图形刻写误差为 $0.012\ \lambda$ 。

在对 CGH 相位面的编码过程中,需要对相位函数二元化并分块拟合,拟合过程中会造成位置的偏离,引起的相位偏差如(2)式所示。本文 CGH 在设计工程中引入的最大编码偏差约在 $0.3\ \mu\text{m}$,由此引入的编码误差为 $0.036\ \lambda$ 。

CGH 主要通过 CGH 面上的辅助对准区域进行定位调整,如调节 CGH 位置使得对准区域只有一根条纹,则通过仿真可以得到其产生的定位误差约为 $0.01\ \lambda$ 。

3 实验与结果

在 Zygo-GPI 干涉仪上建立如图 1 所示的实验装置,对上述光学自由曲面进行测量,标准球面透镜的 F 数选用 $F/7$ 。

实验中,CGH 器件零位补偿法重复测量 10 次,测量结果如图 9 所示,并给出其与 Offner 补偿器测试结果之间的偏差。图 10 给出了其中一次的 Zygo 干涉仪测量结果。通过计算 10 组测量结果之间的标准偏差值,得到了自由曲面测试的重复性分别为 $0.0025\ \lambda$ (PV 值)和 $0.0008\ \lambda$ (RMS 值)。

CGH 器件零位补偿测量光学自由曲面的测量不确定度是将各个分量通过方和根法进行合成。根据误差理论,在合成时,各个分量必须具有相同的概率。测量中的 A 类不确定度和 B 类不确定度如表 2 所示。A 类不确定度用多次重复测量时测量数据的实验标准偏差表征,可以用测量重复性表示。B 类不确定度则无法通过重复测量获得,通常根据经验或一般知识等获得。本文中对于 B 类不确定度,将对测量结果影响较大的因素分为四类,主要有光学系统质量、计算全息片重构波前误差、干涉仪测量误差、CCD 探测与图像量化误差等。

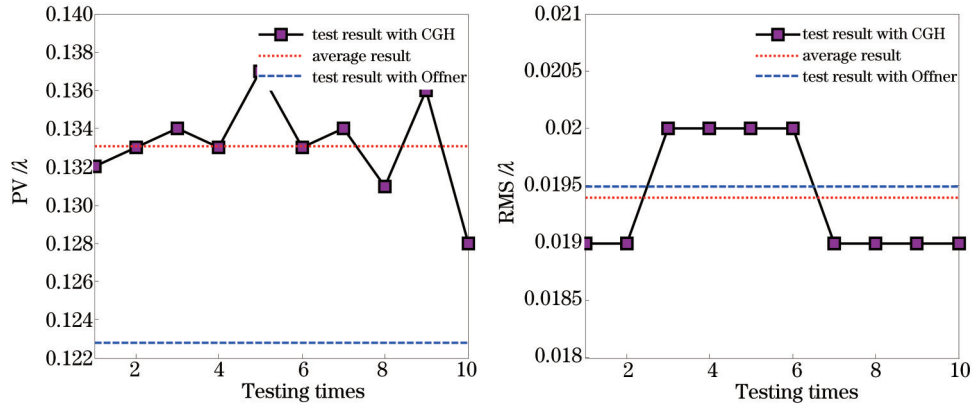


图9 CGH 器件零位补偿 10 次测量结果及其与 Offner 补偿器测试结果的比较($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

Fig.9 Comparison of test result of freeform surface with CGH and Offner compensator ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

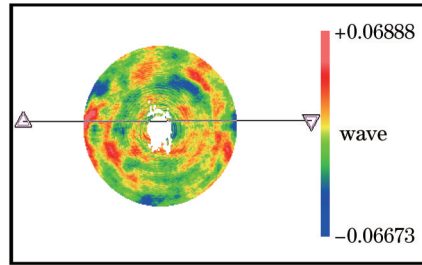


图 10 CGH 零位补偿法的离轴椭球面测试结果

Fig.10 Test result of freeform surface with null CGH compensator

表 2 CGH 器件零位补偿测量自由曲面不确定度分析($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

Table 2 Measurement uncertainty of freeform surface test with null CGH compensator ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

Error type	PV / λ	RMS / λ	Confidence level
Measurement repeatability(A) U_1	0.0025	0.0008	1σ
Optical system quality (B) U_2	0.058	0.008	1σ
Reconstruction wavefront errors by CGH(B) U_3	0.063	0.009	2σ
Measurement error of interferometer (B) U_4	0.01	0.003	1σ
Errors of CCD detection and image quantization (B) U_5	0.01	0.003	1σ

测量重复性通过前述图 9 的十次测量数据获得。光学系统质量通过对干涉系统在未放置 CGH 器件和待测件时对其进行空腔测试,通过多次测量得到光学系统质量的极限值。最后两类误差根据经验及相关文献给出^[16]。上述四种误差均为标准偏差,故置信因子取为 1σ 。CGH 重构波前误差见前述分析,RMS 值按经验取 PV 值的 1/7。计算全息片重构波前误差为极限误差,故置信因子取为 2σ 。在总的测量不确定度合成时,还需要考虑斐索系统中光线经过计算全息片两次,故其误差需要翻倍。于是不确定度合成公式为

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + (2 \times U_3/2)^2 + U_4^2 + U_5^2} \quad (3)$$

因此根据(3)式,CGH 器件零位补偿测量自由曲面的不确定度计算结果为

$$U_{PV_total} = 0.087 \lambda, \quad U_{RMS_total} = 0.0128 \lambda \quad (4)$$

在四维(4D)干涉仪上建立如所示的实验装置,通过对非球面母镜设计 Offner 补偿器,对非球面母镜元件进行检测,并选取有效区域,得到离轴非球面的测试结果。Offner 补偿器法与 CGH 补偿器法完全独立,且采用的补偿器为成熟的球面透镜组成,面形偏差可以通过标定来获得,因此 Offner 补偿器法的测量结果可以作为待测光学自由曲面面形测试的基准,CGH 补偿器法测量结果与 Offner 补偿器法的测量结果的偏差可以作为 CGH 补偿器法的测量误差。图 11 给出了 4D 干涉仪的测量结果。结果显示,离轴椭球面的最终面形为 $f_{PV} = 0.1228\lambda$, $f_{RMS} = 0.0195\lambda$ 。图 9 给出了 CGH 器件零位补偿测量光学自由曲面与 Offner 补偿器法测量结果之间的偏差,结果显示其差异为 $\Delta f_{PV} = 0.0103\lambda$, $\Delta f_{RMS} = 0.0005\lambda$,小于测量不确定度,二者测量结果偏差极小,数据吻合。

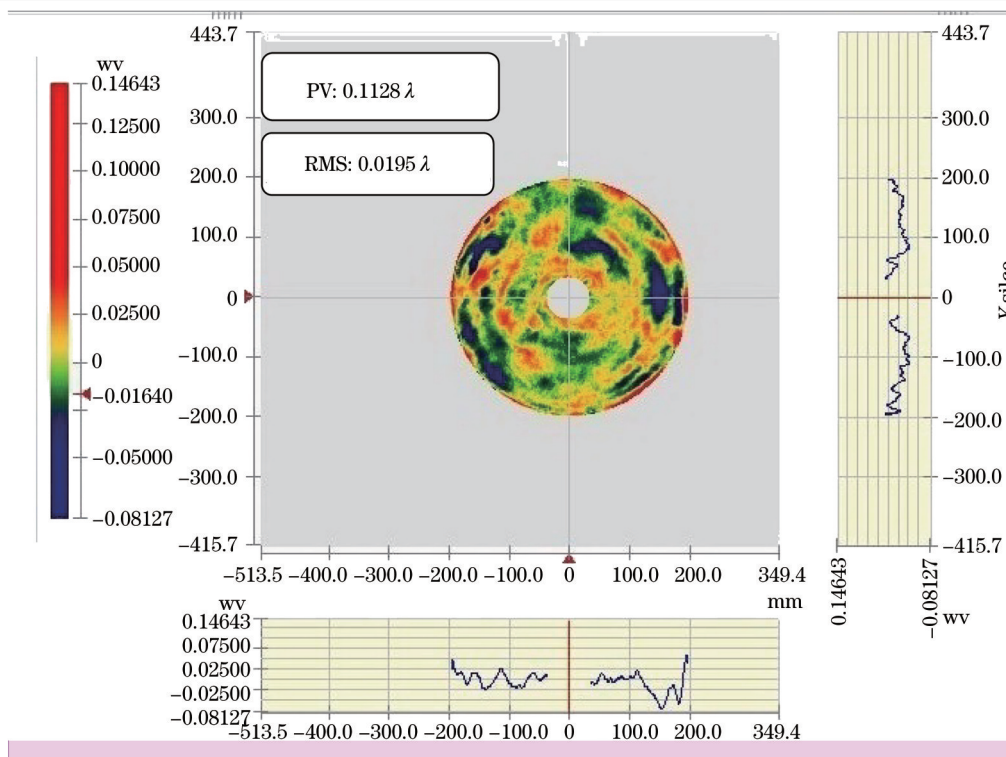


图 11 Offner 补偿器法离轴非球面测试结果

Fig.11 Test result of off-axis aspheric surface with Offner compensators

4 结 论

光学自由曲面元件强大的像差校正能力,比非球面元件的应用更能达到光学系统轻量化的目的,使得其在光学设计中得到了更为广泛的应用。但针对非旋转对称的光学自由曲面元件的检测方法却处于起步阶段,限制了光学自由曲面元件的加工精度和应用范围。通过以上分析研究,针对一个可以通过成熟的 Offner 补偿器法得到参考真值的离轴非球面元件,通过在光路中的旋转平移将其作为在轴光学自由曲面,对该自由曲面设计 CGH 补偿器件,进行零位干涉测量,并进行测量不确定度分析,其测量不确定度 0.087λ 。与参考真值进行比较,CGH 法测量结果为 $(0.133 \pm 0.0025) \lambda$ (PV 值),参考真值为 0.1228λ (PV 值),两者偏差极小,结果吻合,表明 CGH 器件引入的误差很小。研究测量过程的误差值与置信水平,可以得出以下结论,在光学融石英材料的平面基底上制作透射式的相位型 CGH 补偿器件可进行非旋转对称型光学自由曲面的高精度测量,该方法调校方便,测量不确定度优于 $\lambda/10$ (PV 值)。

参 考 文 献

- 1 Li Shengyi, Chen Shangyong, Dai Yifan. Inspection of free-form optics[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2): 126-136.
- 李圣怡, 陈善勇, 戴一帆. 自由曲面光学器件检测技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2): 126-136.
- 2 T Kevin, R Jannick. Freeform optical surfaces: a revolution in imaging optical design[J]. Opt & Photon News, 2012, 23(6): 31-35.
- 3 Zhang Xin, Xu Yingchao. Study on free-form optical testing[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 92-99.
- 张 新, 许英朝. 光学自由曲面的检测方法[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 92-99.
- 4 V N Chekal, Y I Chudakov, S E Shevtsov. The use of coordinate-measurement machines to optimize the technology of automatic shaping of optical surfaces[J]. J Opt Technol, 2008, 75(11): 755-759.
- 5 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 6 J R Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Appl Opt, 1982, 22(15): 2758-2769.
- 7 Ding Lingyan. Application of Phase Retrieval to the Measurement of Aspheric Surfaces[D]. Changsha: National University of Defense

- Technology, 2011.
- 丁凌艳. 非球面相位恢复检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 8 Liu Jiang, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. Application of standard intensity insensitive five-step phase-shifting algorithm in projected fringe deflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1108003.
- 刘江, 王飞, 王高文, 等. 免疫投影基准光强变化的五步移相算法在条纹投影偏折法中的应用[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1108003.
- 9 Su P, Wang Y, Burge J H, *et al.*. Non-null full field X-ray mirror metrology using SCOTS: A reflection deflectometry approach[J]. Opt Express, 2012, 20(11): 12393-12406.
- 10 E Garbusi, C Pruss, J Liesener, *et al.*. New technique for flexible and rapid measurement of precision aspheres[C]. SPIE, 2007, 6616: 661629.
- 11 Shen Hua, Li Jia, Zhu Rihong, *et al.*. Design of non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1222003.
- 沈华, 李嘉, 朱日宏, 等. 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉检测系统设计方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222003.
- 12 Wyant J C, Bennett V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 13 Fercher A F. Computer generated holograms for testing optical elements: error analysis and error compensation[J]. Opt Acta, 1976, 23(5): 347-365.
- 14 C Pruss, S Reichelt, H J Tiziani, *et al.*. Computer generated holograms in interferometric testing[J]. Opt Eng, 2004, 43(11): 2534-2540.
- 15 Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun, *et al.*. Investigation of measurement uncertainty of aspheric surface based on null computer-generated holography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112003.
- 王小鹏, 高志山, 马骏, 等. 非球面测量中零位计算全息测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112003.
- 16 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
- 曾雪峰, 闫锋, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.
- 17 Su P, Ma J, Tan Q, *et al.*. Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture[J]. Opt Eng, 2012, 51(2): 025801.
- 18 Li Fazhi, Luo Xiao, Zhao Jingli, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 709-716.
- 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 709-716.
- 19 Su Ping, Tan Qiaofeng, Kang Guoguo, *et al.*. B-spline interpolation of scattered phase data of computer generated hologram for null test of freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1767-1771.
- 苏萍, 谭峭峰, 康果果, 等. 自由曲面零补偿计算全息图离散相位的B样条拟合[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1767-1771.
- 20 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yu Tao, *et al.*. A method to measure off-axis fabrication and off-axis angle of axis aspheric mirror precisely [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416001.
- 张学敏, 魏儒义, 于涛, 等. 一种实现离轴非球面反射镜离轴量和离轴角精确测量的方法[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416001.
- 21 A Offner. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. Appl Opt, 1963, 2(2): 153-155.
- 22 Wu Fan. Design of reflective Offner compensation for null test of aspherical surface[J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(3): 8-12.
- 伍凡. 非球面零检验的Offner补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3): 8-12.
- 23 Xie Feng, Hao Qun, Zhu Qiudong. Best-fit spheric surface definition based on slope asphericity [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3197-3202.
- 谢枫, 郝群, 朱秋东. 基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3197-3202.
- 24 Li Shijie, Wu Fan, Chen Qiang. Fitting of discrete phase of computer generated hologram for off-axis aspheric test [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(11): 2637-2641.
- 李世杰, 伍凡, 陈强. 计算全息检测离轴非球面的离散相位拟合[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2637-2641.

栏目编辑: 何卓铭