

非球面测量中零位计算全息测量不确定度分析研究

王小鹏^{1,2} 高志山^{1*} 马骏¹ 沈华¹ 马云¹

(¹ 南京理工大学光电学院, 江苏 南京 210094; ² 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 非球面在光学系统中具有非常重要的作用。基于零位补偿计算全息(CGH)的干涉测量方法,因精度高、信息量大、调校方便,在光学计量和制造业领域受到广泛重视。以 F 数为 4 抛物面为测量样品,以光学计量领域比较成熟的平面、球面波象差,采用自准直方法,测出抛物面面形波象差;再用零位补偿 CGH 方法测量同一块样品,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,在光学熔融石英平面基底上制作零位补偿 CGH,测量不确定度达到 $\lambda/10$ [峰谷值(PV), $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$],满足非球面波象差光学计量的要求。

关键词 测量;非球面;波象差;标准球面;抛物面;干涉测量

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0112003

Investigation of Measurement Uncertainty of Aspheric Surface Based on Null-Computer-Generated Holography

Wang Xiaopeng^{1,2} Gao Zhishan¹ Ma Jun¹ Shen Hua¹ Ma Yun¹

¹ Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
² Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Aspheric surface acts as an important role in optical system. Because of its high precision, large data information and easy alignment, interferometric measurement method based on null computer-generated hologram (CGH) element is widely emphasized in the field of optical metrology and optical manufacture. A paraboloid acting as a special aspheric surface sample is measured in auto-collimated interferometric path by using flats and transmission spheres. Then error data are obtained by means of measuring the same sample with null-CGH in interferometric path. By the calculation of major error data, a conclusion that the measurement uncertainty can reach $\lambda/10$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) which meets the requirement of optical metrology if null-CGH is made in a flat of fused silica with enough thickness.

Key words measurement; aspheric surface; wave-front aberration; standard sphere; paraboloid; interferometric test

OCIS codes 120.6650; 220.1250; 120.3180; 120.3940

1 引 言

非球面面型种类繁多,可以有效地简化系统结构,减轻重量,改善光学系统的像质。在非球面制造领域,可以依靠接触式轮廓仪抽查几根线上的轮廓误差,数据量小,因此能加工的非球面最小面形误差国外在 $0.3 \mu\text{m}$ [峰谷值(PV)],国内在 $0.5 \mu\text{m}$ (PV)左右,且局部误差很大,严重降低成像系统的调制传

递函数(MTF)值,使中等口径的非球面在可见光或短波段系统中的大量应用受到限制^[1]。

只有获得整个通光孔径内的面形误差信息,才能有效控制非球面的局部误差。对大口径天文望远镜中的非球面,可以应用于干涉仪借助于零位补偿透镜或计算全息(CGH)器件,根据干涉图获取非球面面形误差^[2~5]。在光学计量领域,希望非球面面形误

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(60678048,60977008)资助课题。

作者简介: 王小鹏(1962—),男,研究员,主要从事光电总体和光学测量等方面的研究。E-mail: xiaopel@yahoo.com.cn

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

差能达到 $0.063 \mu\text{m(PV)}$, (即 $\lambda/10, \lambda=0.6328 \mu\text{m}$); 或者 $0.01 \mu\text{m}$ [波像差(RMS)], 即约 $\lambda/60$ 。如此才能确保应用非球面透镜或反射镜光学系统的像质接近于衍射极限(RMS 达到 $0.031 \mu\text{m}$, 相当于 $\lambda/20$)。

CGH 补偿器件可以在平面基底上制作, 可分区制作补偿和调校对准器件。随着微电子光刻设备的技术发展, 国内自研或进口了大量先进的光刻设备, 其刻蚀激光焦斑的定位精度可达到 $0.1 \mu\text{m}$, 可以准确刻蚀 $250\sim 500 \text{ lp/mm}$ 的线频。因此 CGH 补偿器件具有补偿波面精度高, 占用测试空间尺寸小, 易于调校等优点, 具有制作高精度补偿器件的优势; 而且随着空间光调制器(SLM)空间分辨率的不断提高, 将来可能会出现应用计算机控制 SLM 实现动态补偿“衍射器件”测量非球面的趋势。

本文以抛物面反射镜为测试对象, 比较研究了 CGH 器件零位补偿法和自准直法两种方法的测量结果, 由此研究 CGH 器件在参考球面和被测非球面之间的误差传递情况, 分析 CGH 器件的测量不确定度。

2 原 理

2.1 测量方案

为了研究现有微电子领域光刻设备制造零位补

偿器件测量非球面的不确定度大小, 在光学熔融石英平面基底上设计制作二元相位型补偿器件, 测量抛物面反射镜, 光路原理如图 1 所示。图中由干涉仪出射平面波, 经标准球面透镜后, 变成标准球面波, 一部分由标准球面透镜的末标准球面反射回干涉仪, 作为标准波面, 一部分透过标准球面透镜, 被二元补偿器件转化成非球面波, 沿法线方向正入射被测面, 由被测面反射回的波面携带了被测面的面形误差信息, 与标准波面汇合后, 产生干涉图样。

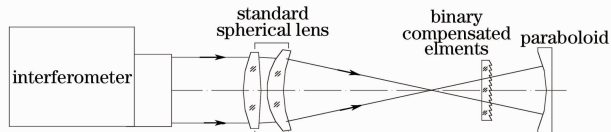


图 1 零位补偿法光路

Fig. 1 Diagram of null-testing optical path

抛物面属于二次回转曲面, 具有无像差点, 可以由参考球面直接传递测量其面形误差, 光路原理图如图 2 所示。由干涉仪发出平面波, 经标准球面透镜变成会聚球面波, 经过位于其焦点处标准平晶的中心小孔后, 射向抛物面, 转化成准直光束后由标准平晶的标准面原路返回, 再次被抛物面反射后, 透镜的中心孔与标准平晶的末球面反射光波汇合, 产生干涉图样。由于波面两次经过抛物面, 干涉图样反映“双程”面形误差。

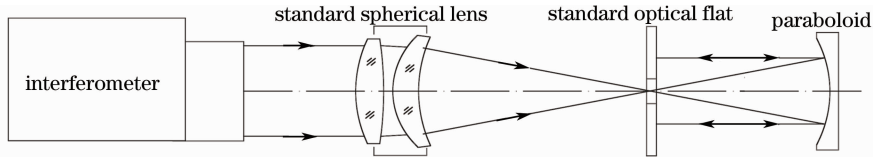


图 2 自准法光路

Fig. 2 Diagram of auto-collimating optical path

目前球面和平面基准问题已被解决^[6,7], 经过以上两种测量光路, 测量同一抛物面, 可以研究分析 CGH 补偿器件在参考球面与非球面之间的误差传递大小, 论证 CGH 器件应用在光学计量领域产生高质量非球面基准的可行性。

2.2 CGH 器件的设计与制作

光学计量领域应用的光学元件材料一般要求理化性能稳定, 温度系数小, 便于保证光学元件稳定的光学质量。CGH 器件的基底材料选择光学熔融石英, 具有较高的折射率均匀性和很低的温度系数。

设计时, 可充分利用 CGH 器件具有分区设计、编码、制作的特点, 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 3 所示。图 3

中, 补偿区域位于 $\phi 58 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 器件中央偏心区域, 边缘月牙形区域用于设计 CGH 器件的定位调整指示, 原理是由标准球面透镜出射会聚光束的边缘部分入射到 CGH 器件的月牙形区域时, 被原路返回, 由干涉图指示 CGH 器件的定位情况。

图 3 中显示的 CGH 器件上“两耳”区域, 可以将边缘部分光束会聚到被测件的顶点, 返回光束形成的干涉图, 用于指示被测件的定位情况。

以下式表示 CGH 器件(基底为平面元件)表面的相位函数:

$$\Phi(\rho) = M(A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + \dots), \quad (1)$$

式中 M 为采用的衍射级次, A_1, A_2, \dots 为归一化半径 ρ 的次幂对应的系数。表 1 给出了 CGH 器件上各

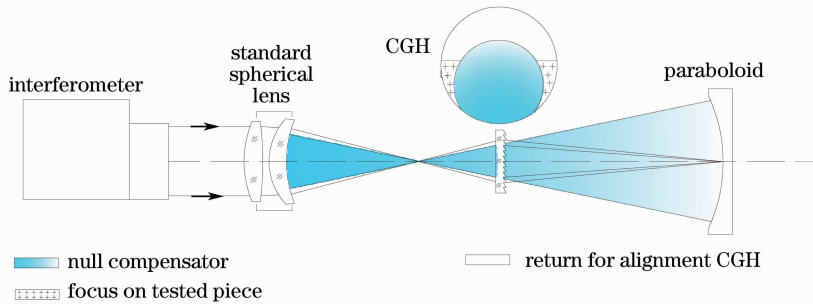


图 3 衍射器件分区设计示意图

Fig. 3 Diagram of division area of CGH element

表 1 CGH 器件相位函数结果

Table 1 Phase function results of CGH element

Area	$\Phi(\rho)$	M	$\nu_{\max}/(\text{lp}/\text{mm})$	Grating type	Operating mode
Null	$-2.207\rho^2 - 1.353 \times 10^{-4}\rho^4 + 7.449 \times 10^{-9}\rho^6 - 4.178 \times 10^{-13}\rho^8$	1	45	Phase type	Transmission
Focus	$-9.755\rho^2 + 2.85 \times 10^{-5}\rho^4 - 2.0 \times 10^{-10}\rho^6$	3	262	Phase type	Transmission
Return	$-28.03\rho^2 - 3.429 \times 10^{-4}$	3	101	Amplitude type	Reflection

区域相位函数的设计结果。

以上设计结果经编码^[8]后,由中国科学院微电子所光刻成相位型器件(聚焦区为振幅型器件),图

4 给出了加工完成的器件表面二元浮雕由台阶仪和扫描电镜测得的结果,由图 4 可见,刻蚀深度约 450 nm,二元特征满足要求。

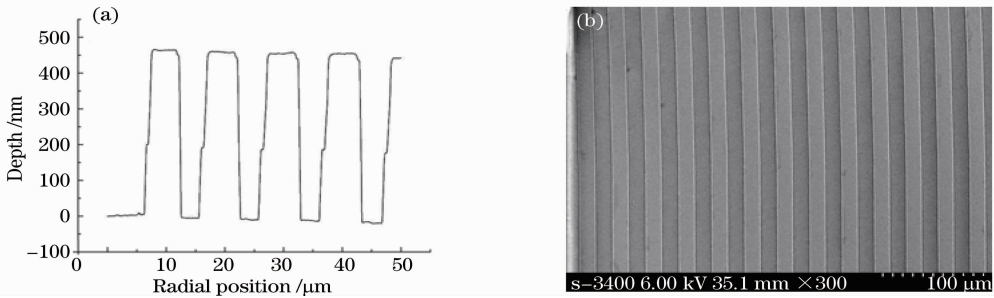


图 4 CGH 器件的台阶仪结果(a)和扫描电镜结果(b)

Fig. 4 Results of CGH element by (a) step-profiler and (b) scanning electronic microscope

2.3 原理误差分析

图 1 采用的零位补偿法,测量光束正入射被测抛物面,得到的干涉图直接反映被测抛物面面形误差;图 2 采用自准直法,边缘测量光束以 7.47° 入射抛物面后反射,经标准平面反射后再次经过抛物面,得到的干涉图反映非正入射(如边缘入射角 7.47°)

时抛物面形双程误差被“投影”后的结果,因此比对二者测量结果时,可能存在原理误差,且原理误差与抛物面面形存在的误差有关。

应用 Zemax 软件建立模拟光路,可以给出这一原理误差分布,如表 2 所示。

表 2 零位补偿法和自准直法之间的原理误差

Table 2 Theoretical errors between null test and auto collimating test

Method	Wavefront error / λ					
Null test	0.034	0.102	0.170	0.272	0.340	0.68
Auto-collimating	0.030	0.091	0.153	0.244	0.305	0.61
Theoretic error	0.004	0.011	0.017	0.028	0.035	0.07
Relative error /%	13	11	11.4	11.4	11.5	11.5

由表 2 看出,随着抛物面面形误差值(PV)从 0.034λ 增加到 0.68λ ,原理误差由 0.004λ 增加到 0.07λ ,相对误差约为 11.5%左右。如果抛物面的面形误差较大,即偏离理想抛物面面形较大,则原理误差更大。为了研究 CGH 器件在参考球面与抛物面之间的误差传递情况,被测抛物面样品面形误差值(PV)宜控制在 0.2λ 以内,例如 0.14λ 。

3 实验与结果

在 Zygo-GPI 6 干涉仪上建立如图 1 和 2 所示的实验装置,标准球面透镜的 F 数选用 0.75,测量 F 数为 4 抛物面时,只使用其中央极小区域的标准球面和出射光束,光学质量能达到 PV 值小于 $\lambda/30$ 。带孔的标准平面由低膨胀微晶玻璃制作而成,其面形质量

PV 值小于 $\lambda/20$,干涉图如图 5 所示。

实验中,CGH 器件零位补偿法和自准直法各重复测量 10 次,结果分别如表 3 和表 4 所示,并求出其平均值和标准差。图 6 和图 7 分别给出了其中 1 次的 Zygo 干涉仪测量结果图片,其中图 6 反映零位补偿下的结果,图 7 反映自准直测量的双程结果,转换到抛物面面形误差,需将结果除以 2。表 5 给出两种方法平均值结果对比,二者测量结果吻合。考虑到球面系统光学质量为 $\lambda/30(e_1)$ 、带孔平面面形精度为 $\lambda/20(e_2)$ 以及测量原理误差(e_3) (由表 2 可知,估计达 0.017λ) 等因素引入的测量不确定度:

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{30}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{20}\right)^2 + (0.017\lambda)^2} = 0.06\lambda. \quad (2)$$

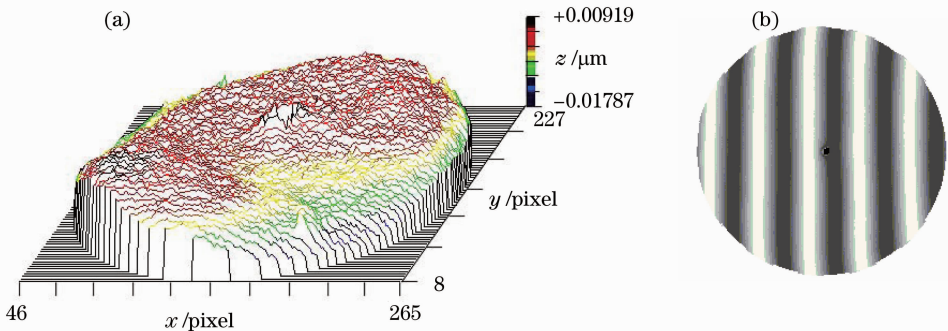


图 5 带孔标准平面的面形误差。(a)三维波面,(b)干涉图

Fig. 5 Wavefront of reference flat with central hole. (a) 3-D wavefront, (b) interferogram

表 3 零位补偿法 10 次测量结果

Table 3 10-times measured values of null CGH test

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average /Standard deviation	
Result	PV	0.138	0.135	0.139	0.137	0.134	0.136	0.135	0.141	0.135	0.134	0.136/0.0022
	RMS	0.021	0.021	0.022	0.021	0.020	0.022	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021/0.0006

表 4 自准直法 10 次测量结果

Table 4 10-Times measured value of auto-collimation test

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average/Standard deviation	
Result	PV	0.135	0.135	0.138	0.136	0.134	0.136	0.138	0.137	0.134	0.140	0.136/0.0018
	RMS	0.020	0.022	0.020	0.020	0.020	0.022	0.020	0.020	0.020	0.022	0.021/0.0009

表 5 比对结果

Table 5 Comparison results of null CGH and auto-collimation test

Wavefront error	Null CGH test	Auto-collimation test
PV	0.136 ± 0.0022	0.136 ± 0.0018
RMS	0.021 ± 0.0006	0.021 ± 0.0009

由结果看出,应用光学融石英材料按一定厚径比与面形要求制作的透射型 CGH 补偿器件测量抛物面相比,测量不确定度估计优于 $\lambda/10$ (PV),能够满足光学计量的要求。

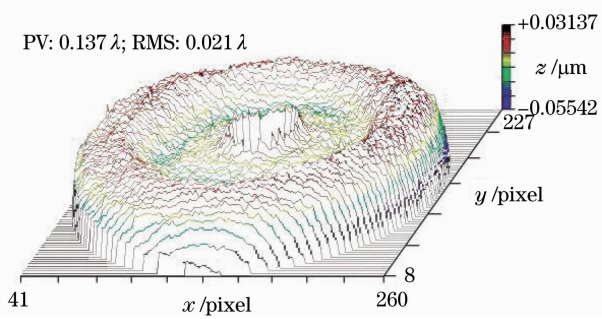


图 6 CGH 零位补偿法的抛物面单程测量结果
Fig. 6 Results of paraboloid tested by null-CGH in single path

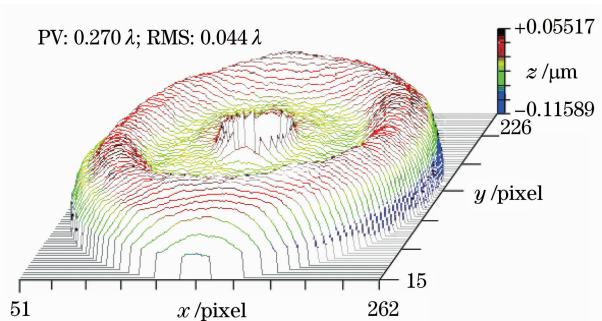


图 7 自准直法的抛物面双程测量结果
Fig. 7 Results of paraboloid tested by auto-collimating in double path

4 结 论

平面基底的单片 CGH 器件作为零位补偿器件测量非球面,已在某些重要领域获得应用。通过以上分析与实验研究,由自准直法测量抛物面,将球面和平面基准传递到被测抛物面,再由抛物面传递到 CGH 补偿器件。自准直法测量结果为 $0.136 \pm 0.0022(\lambda)$ (PV),零位补偿法测量结果为 $0.136 \pm$

$0.0018(\lambda)$ (PV),二者结果吻合,表明 CGH 补偿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:在光学石英材料的平面基底(满足厚径比接近于 1:10,避免基底面形误差引入 CGH 出射波面畸变)上制作透射型的 CGH 补偿器件,测量非球面,调校更方便,测量不确定度可以达到 $\lambda/10$ (PV),满足光学计量的要求。

参 考 文 献

- 1 Shen Weimin, Xue Mingqiu, Yu Jianjun. Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 329~332
沈为民,薛鸣球,余建军.长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(4): 329~332
- 2 C. Pruss, S. Reichelt, H. J. Tiziani *et al.*. Computer-generated holograms in interferometric testing[J]. *Opt. Engnol.*, 2004, **43**(11): 2534~2540
- 3 PanJunhua. *Fabrication, Design and Test of Aspheric* [M]. Beijing: Science Press, 1994
潘君骅. *光学非球面的加工、设计与检验* [M]. 北京:科学出版社,1994
- 4 Ping Su, Guoguo Kang, Qiaofeng Tan *et al.*. Estimation and optimization of computer-generated hologram in null test of freeform surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7** (12): 1097~1100
- 5 Zhishan Gao, Meimei Kong, Rihong Zhu *et al.*. Problems on design of computer-generated holograms for testing aspheric surfaces: principle and calculation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 241~244
- 6 Zhishan Gao, Lei Chen, Zhou Songzuan *et al.*. Computer-aided alignment for a reference transmission sphere of an interferometer [J]. *Opt. Engnol.*, 2004, **43**(1): 69~74
- 7 Zhishan Gao. Analysis of coincidence tolerance between F' and C for the transmission spheres with small F-number[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 793~796
高志山.小F数标准球面透镜组的F'C重合误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 793~796
- 8 Jun Ma, Zhishan Gao, Rihong Zhu. Problems on fabrication of computer-generated holograms for test aspheric surfaces [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 70~73