

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0286-04

利用扩展球面绝对检验进行的双重编码 计算全息图分析

王 青 马 骏 董琳琳

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 介绍了利用扩展的球面绝对检验技术,对于双重编码计算全息图(Twin-CGH)进行的分析。通过 5 次检验法,分别分离出了 Twin-CGH 两种不同光焦度下球面波的图形刻写误差和基底误差,证明两组全息图各自造成的波面误差间具有固定的联系。这种联系体现在两组相位函数对应的空间频率的联系中。利用 Twin-CGH 的误差传递公式,将两种状态下的误差进行相互推导,并将推导出的结果与实验结果进行比较,其差值小于 $\lambda/40$ (PV, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。验证了 Twin-CGH 中误差传递的可行性,说明可以运用球面与非球面融合的 Twin-CGH 来获得已知误差的非球面反射波面,对零位光栅进行标定。

关键词 全息; 双重编码计算全息图; 零位光栅; 球面绝对检验

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0286

Analysis of Twin-CGH by Extended Absolute Measurement of Sphere

Wang Qing Ma Jun Dong Linlin

(College of Electron Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract An analysis of a multiplex computer-generated hologram (Twin-CGH) is presented, with the extended absolute measurement of spherical surfaces. By means of the five-position test, the pattern error and figure error of Twin-CGH operated in spherical modes with two different optical power are separated respectively, and internal relations between two different holograms are proved. This relations is based on the relations of the spatial frequencies corresponding to two different phase functions. In this article, two kinds of errors in different modes are derived from each other. The derivative results are compared with experimental ones, and the residual error are less than $\lambda/40$ (PV, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$). The results demonstrate the feasibility of error transfer in Twin-CGH. It shows that the aspherical reflective surface with known errors can be obtained using a Twin-CGH which reconstructs a spherical wavefront as well as an aspherical wavefront. The aspherical reflective surface can calibrate null grating.

Key words holography; multiplex computer-generated hologram; zero position grating (null grating); absolute calibration

非球面光学元件在现代光学系统中的运用广泛^[1],可使系统结构简化、像差减小、光能增加,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性。目前,在中等口径高精度光学系统中,非球面的应用还不多,主要是受制于高精度检验手段的缺乏以及加工困难。现有的常用非球面检验方法有^[2]:轮廓仪、刀口阴影法、郎奇检验法、计算全息干涉法等。轮廓

仪只能按直径测量,难以获得整个面形的情况;刀口阴影法和郎奇检验法常为定性测量,且依赖于测量人员的经验和熟练程度。因此计算全息干涉法是目前最受关注的方法^[3]。

对于高精度的面形检验来说,干涉方法是快速、方便的方法。然而与平面及球面不同,标准非球面的概念无法准确定义,因此一般采用编码计算全息

图(CGH)零位光栅来产生一个非球面波与被测件进行干涉。而对这个零位光栅的精度检验与控制,则成了一个重要问题。非球面绝对检验,就是在这种情况下被提出来的^[4]。该方法是采用基于特殊设计的双重反射光栅(Twin-FZM),重建一个球面波和一个非球面波。用五步绝对检验的方法对球面波进行检验,CGH的两种误差,即图形刻写偏差和基底局部面形偏差相分离。因为球面波和非球面波是在一片基底上同时编码并进行图形刻写的,两个波前的误差可以相互传递。于是可以计算得到非球面状态下的 Twin-FZM 反射波前误差,并将之用于标

定 CGH 零位光栅的系统误差,从而实现非球面的绝对检验。因此,该方法两个基础,一是对球面绝对检验进行扩展,检验 FZM 的±1 级衍射球面波,并分离出刻写误差和基底面形误差;二是通过一定的传递公式,计算出非球面波的偏差。

球面绝对检验的三次测量方法已经为人们所熟知^[5,6]。使用产生球面波的反射光栅作为被测件,进行扩展球面绝对检验五步测量方法(图 1),就是将光栅的±1 级衍射球面波分别作为凹凸球面进行绝对检验以分离各种误差——五个测量波前分别为焦内、焦内旋转、焦外、焦外旋转、猫眼。

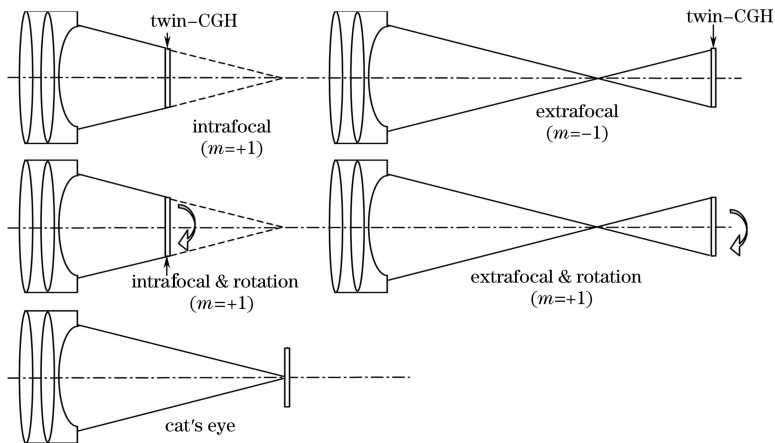


图 1 以 FZM 产生球面波反射的扩展球面绝对检验

Fig. 1 Extended absolute measurement of sphere with spherical wavefront reflected by FZM

在五步检验中,首先是定义参与干涉的各个元件误差:干涉仪误差 W_O ,齐明透镜的标准参考球面误差 W_R ,被测 FZM 的贡献 W_{FZM} ,其中包括了待分离图形刻写偏差 W_{PD} 和基底面形偏差 W_{PASS} 。于是各次测量获得的干涉波前为

焦内位置

$$W_{if}^0 = W_{FZM\ if}^0 + W_O^0 + W_R^0, \quad (1)$$

$$W_{if}^\pi = W_{FZM\ if}^\pi + W_O^0 + W_R^0, \quad (2)$$

焦外位置

$$W_{ef}^0 = W_{FZM\ ef}^0 + W_O^0 + W_R^0, \quad (3)$$

$$W_{ef}^\pi = W_{FZM\ ef}^\pi + W_O^0 + W_R^0, \quad (4)$$

猫眼位置

$$W_F = W_R^0 + \frac{1}{2}(W_O^0 + W_O^\pi), \quad (5)$$

其中

$$W_{FZM} = W_{PD} + W_{PASS}, \quad (6)$$

式中 W_{if} 、 W_{ef} 和 W_F 分别表示焦内、焦外和猫眼位置测得的波前。上标 0 或 π 表示待测面旋转 0° 或 180° ,下标 if 和 ef 分别表示焦内和焦外的位置。与球面绝对检验的公式相同,可以得出 FZM 的误差

$$W_{FZM\ if}^0 = \frac{1}{2}(W_{if}^0 + \bar{W}_{if}^\pi - W_F - \bar{W}_F), \quad (7)$$

$$W_{FZM\ ef}^\pi = \frac{1}{2}(\bar{W}_{ef}^0 + W_{ef}^\pi - W_F - \bar{W}_F). \quad (8)$$

下面,就是要把 FZM 的图形刻写偏差和基底局部面形偏差进行分离。在 FZM 中,图形刻写偏差引入的波前像差可表示为

$$W_{PD}(x, y) = -m_R \lambda_0 \zeta(x, y) \cdot \mathbf{v}(x, y), \quad (9)$$

其中, m_R 是重建波的衍射级次, λ_0 是设计波长, ζ 是图形刻写偏差矢量,定义为 $\zeta = \zeta_N \cdot \zeta_N + \zeta_T \cdot \zeta_T$, ζ_N , ζ_T 是法线和切线方向的单位矢量。对于干涉来说,重建波前只对法线方向的位置误差 ζ_N 敏感,因此,(9)式可以简化成

$$W_{PD}(x, y) = -m_R \lambda_0 \zeta_N(x, y) \nu_N(x, y), \quad (10)$$

其中 ν_N 是 FZM 法线方向的局部空间频率。基底局部面形偏差对波前的影响与衍射波前方向上的会聚角 α 有关。对于微小平滑的面形偏差,其引入的法线方向的波前像差可以表示为

$$W_{PASS\perp} = W_{PASS} \cos \alpha, \quad (11)$$

因此,根据球面波的旋转对称性,在五步法中有

$$W_{PD\ if}^0 = -W_{PD\ ef}^\pi, \tag{12}$$

$$W_{PASS\ if}^0 = W_{PASS\ ef}^\pi. \tag{13}$$

结合(9)式~(11)式和(12)式,(13)式,将图形刻写偏差 W_{PD} 和基底面形偏差 W_{PASS} 相分离

$$W_{PD} = W_{PD\ if}^0 = -W_{PD\ ef}^\pi = \frac{1}{4}(W_{if}^0 + \bar{W}_{if}^\pi - \bar{W}_{ef}^0 - W_{ef}^\pi), \tag{14}$$

$$W_{PASS} = W_{PASS\ if}^0 = W_{PASS\ ef}^\pi = \frac{1}{4}(W_{if}^0 + \bar{W}_{if}^\pi + \bar{W}_{ef}^0 + W_{ef}^\pi) - \frac{1}{2}(W_F + \bar{W}_F). \tag{15}$$

对于融合了两个不同曲率半径球面波的 Twin-FZM,通过扩展球面绝对检验可以分别获得在两个曲率半径下的图形刻写偏差和基底面形偏差。实验采用的 Twin-FZM 反射波面曲率半径分别为 55 mm 和 70 mm,使用 $f/1.5$ 的标准齐明透镜,在 Zygo 干涉仪上进行。表 1 为 9 个位置的测量结果,图 2 为 55 mm 焦内测量的干涉图。从图上可以看

出,波面带有较大的波差,根据(14)式和(15)式,通过波面的点-点运算,可以得到 Twin-FZM 在两种不同曲率半径球面波情况下的图形刻写偏差和基底面形偏差(表 2 中的直接计算结果)。计算结果表明,球面波的误差主要来自于基底局部面形偏差,这为改进 CGH 的制作提供了方向。

表 1 扩展的球面绝对检验测量结果 (单位: $\lambda=632.8\text{ nm}$)
Table 1 Results of extended absolute measurement of sphere (Unit: $\lambda=632.8\text{ nm}$)

		PV	RMS
55 mm	Extrafocal	0.688	0.131
	Extrafocal & rotation	0.672	0.134
	Intrafocal & rotation	0.694	0.137
	Intrafocal	0.705	0.139
70 mm	Extrafocal	0.679	0.133
	Extrafocal & rotation	0.675	0.128
	Intrafocal & rotation	0.694	0.137
	Intrafocal	0.686	0.136
	Cat's eye	0.069	0.013

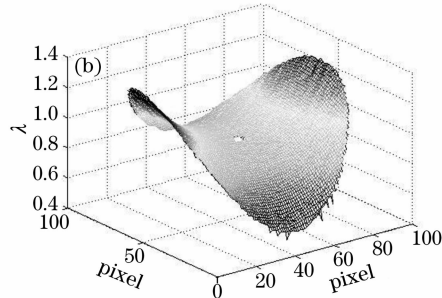
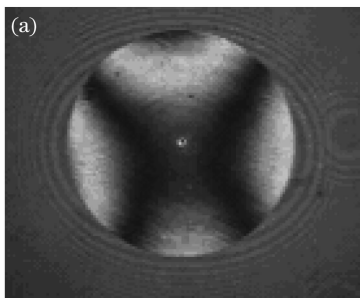


图 2 Twin-FZM 的球面波干涉图及其复原波面图

Fig. 2 Interferogram of the Twin-FZM and it's figure of wavefront

表 2 直接计算结果及波面比较分析 (单位: $\lambda=632.8\text{ nm}$)

Table 2 Results of calculation and analysis of wavefront (Unit: $\lambda=632.8\text{ nm}$)

	Direct results		Results worked out by another radius		Compared by point to point	
	PV	RMS	PV	RMS	PV	RMS
Wavefront of pattern error ($r=55\text{ mm}$)	0.222	0.044	0.226	0.045	0.037	0.005
Wavefront of pattern error ($r=70\text{ mm}$)	0.175	0.035	0.171	0.034	0.029	0.004
Wavefront of substrate error ($r=55\text{ mm}$)	0.625	0.126	0.645	0.128	0.040	0.008
Wavefront of substrate error ($r=70\text{ mm}$)	0.640	0.127	0.620	0.125	0.040	0.008

表 2 还给出了由一个曲率半径绝对检验数据推导获得的,在另一个曲率半径情况下的结果,这是因为对于两个同时编码的球面波,其图形刻写偏差和基底局部面形偏差在理论上是相关的^[4],可以通过如下公式相互传递

$$W_{PD2}(x, y) = \frac{\nu_{N2}(x, y)}{\nu_{N1}(x, y)} W_{PD1}(x, y), \tag{16}$$

$$W_{PASS2}(x, y) = \frac{\cos \alpha_1(x, y)}{\cos \alpha_2(x, y)} W_{PASS1}(x, y), \tag{17}$$

式中 α_1, α_2 分别为两个衍射球面波在点 (x, y) 上的会聚角,并假设两个重建波前衍射波带相互平行 ($\mathbf{v}_{N1} // \mathbf{v}_{N2}$)。从表 2 最后两列的残差波面(点-点相减)结果显示,对于 Twin-FZM 的两个球面波,由误差传递公式计算出的结果和实验测得的结果相比较, W_{PD} 和 W_{PASS} 的残差的均方根(RMS)均仅为千分之几个波长。这说明扩展的球面绝对检验对于反射式 CGH 检验的准确性,和误差传递的高精度(在这

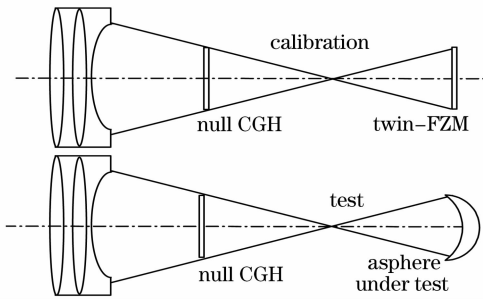


图 3 非球面绝对检验

Fig. 3 Absolute measurement of asphere

里必须注意的是要保证多波面测试之间的空间一致性^[7~9]。如果将一个球面波和一个非球面波融合,就可以通过球面波的扩展绝对检验和误差传递公式,获得非球面波的高精度标定结果。这个标定过的非球面波可以作为零位 CGH 的校准波来进行非球面的绝对检验(图 3)。

参 考 文 献

1 Qiao Yujing, Lü Ning. Study on aspheric surface and aspheric measurement[J]. *J. Harbin University of Commerce (Sciences Edition)*, 2005, **21**(3): 357~361
 乔玉晶,吕 宁. 非球面及非球面测量技术[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2005,**21**(3): 257~361

2 Pan Junhua. Design Process and Testing of Optical Aspheric Surface[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004
 潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004

3 Xi Qingkui, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. Methods on testing an aspheric with a computer generated hologram[J]. *Laser J.*, 2004, **25**(6): 67~69
 席庆奎,朱日宏,陈 磊 等. 计算全息用于非球面检测的方法[J]. 激光杂志, 2004, **25**(6):67~69

4 S. Reichelt, H. J. Tiziani. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**: 23~32

5 Bruce E. Truax. Absolute interferometric testing of spherical surfaces[C]. *SPIE*, 1990, **1400**: 61~68

6 Wang Qing, Zhu Rihong, Chen Jingbang *et al.*. Realization of spherical absolute testing[C]. *SPIE*, 1998, **3558**: 272~277

7 Wang Wei, Wang Qing, He Yong *et al.*. The position relationship in multi-interferograms [C]. *SPIE*, 2004, **5638**: 878~881

8 Dai Xiaofang, Wei Yuelin, Ge Baozhen *et al.*. Study on improving precision of aspheric surfaces test by computer-generated hologram [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(1): 52~56
 戴晓芳,魏耀林,葛宝臻 等. 提高计算全息检测非球面精度的研究[J]. 中国激光, 1996, **A23**(1): 52~56

9 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1317
 谢意,陈 强,伍 凡 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1313~1317