

# 用于检测三次位相板的新型零位补偿器的设计

许英朝<sup>1,2</sup>, 张 鹰<sup>3</sup>, 林洪沂<sup>1,2</sup>, 朱文章<sup>1,2</sup>, 张 新<sup>3</sup>

(1. 厦门理工学院数理系, 福建 厦门 361024; 2. 厦门理工学院光电工程技术研究中心, 福建 厦门 361024

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 三次位相的波前编码位相板是一种非旋转对称光学元件。对于其面形及整个元件的检测, 虽然目前通用的方式还是采用轮廓仪的接触式测量, 但采用非接触式的干涉测量, 具有快速、简洁、可避免待测元件的面形不受损伤等优点。非接触式的测量方法, 可以采用计算全息图进行零位补偿, 但计算全息图的制作价格相对较高。我们根据三次位相波前编码板的面形特点, 得到一种新型的零位补偿方式, 并给出了设计实例, 并进行了实验验证, 该补偿器全部由球面镜组成, 易于加工, 且成本较低。

**关键词:** 三次位相板; 面形检测; 零位补偿; 光学设计

**中图分类号:** TN256      **文献标识码:** A

## New design of null lens to test cubic phase plate

XU Ying-chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>, LIN Hong-yi<sup>1,2</sup>, ZHU Wen-zhang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>

(1. Mathematics and Physics Department Xiamen University of Technology, Xiamen 361024 China

2. Opto-electrical Engineering Research Center Xiamen University of Technology, Xiamen 361024 China

3. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract** This cubic wavefront coding phase plate is an asymmetrical surface. Up to now, its main testing method in the industry is using the contact profiler. But non-contact testing method has more virtues, for example, simple, swift, unhamful to the surface under test. Non-contact testing method can use computer-generated hologram (CGH) as null lens, but the CGH manufacture cost is comparatively expensive. We gave a new manner of null lens to test the cubic surface according to the surface characteristic of the cubic wavefront coding phase plate. We described a design of the null lens and made some experiments. The null lens consists of two spherical lenses which are easy to be manufactured at a low price.

**Key words** cubic phase plate; surface test; null lens; optical design

### 1 引言

对于大口径的旋转对称的非球面, 采用补偿法具有独特的优点, 通常补偿器的尺寸要比被检验<sup>[1]</sup>的镜面小好几倍。补偿法是一种无接触干涉测量, 可以保证定性和定量地评价面形偏差。补偿法已经是一种十分成熟的检测方法, 在国内, 虽然 CGH 已经应用于大口径非球面镜的检测, 目前检测大口径的非球面镜依然主要采用零位补偿法。

而对于非旋转对称的复杂光学曲面的面形检测, 虽然目前通用的方式还是采用轮廓仪的接触式

测量, 但是触针式的接触式测量测量时间较长, 并易在质地较软的待测面上造成划痕。采用非接触式的干涉测量, 有快速、简洁、可避免待测元件的面形不受损伤等优点。非接触式的测量方法, 可以采用计

基金项目: 福建省自然科学基金青年创新项目 (No. 2010J05144); 福建省教育厅 A 类项目 (No. JA10248); 国家自然科学基金 (No. 61050007); 厦门市科技计划项目 (No. 3502Z20093039) 资助。

作者简介: 许英朝, 男, 博士, 讲师, 研究方向为光学设计, 光学检测, LED 照明设计。E-mail: yexi@xmut.edu.cn

收稿日期: 2010-12-27; 修订日期: 2011-02-16

算全息图进行零位补偿<sup>[2-3]</sup>,但计算全息图的制作价格相对较高。因此对于特殊的非旋转对称的光学面形,可以考虑设计易于制作且成本不高的零位补偿器。

三次位相波前编码板是一种非旋转对称的光学元件,显然,为了补偿三次位相板的特殊面形产生的波像差,设计零位补偿器<sup>[4]</sup>时,应该对各种像差进行深刻地认识。

我们根据三次位相波前编码板的面形特点,设计了一种新型的零位补偿方式,并给出了设计实例,该补偿器全部由球面镜组成,因此易于加工,且成本较低。文中通过检测一个  $\phi 13\text{ mm}$  的三次位相板,给出了简易的实验验证,最终的补偿效果良好。

### 2 设计原理

根据三次位相板的特殊位相,我们考虑利用几块倾斜装调的球面透镜组合在一起作为检测系统的零位补偿器。其中利用球面透镜去补偿三次位相板的大部分彗差项和一部分像散<sup>[5-6]</sup>,得到工程设计上可以接受的效果。

如图 1 所示,不难看出,彗差波面的干涉图样和三次位相的干涉图样有一定的相似性。



(a) 彗差波面干涉图 (b) 三次位相波面干涉图  
(a) the interferogram of coma wavefront (b) the interferogram of cubic wavefront

图 1 彗差波面与三次位相波面的干涉图比较  
Fig 1 comparison between the interferograms of the coma wavefront and the cubic wavefront

彗差表达式:

$$\text{coma} = W_{131} = H \rho^3 \cos \theta \quad (1)$$

而三次位相板的面形的表达式:

$$\begin{aligned} z &= \alpha (x^3 + y^3) \\ &= \alpha [\rho^3 \cos^3 \theta + \rho^3 \cos^3 (90^\circ - \theta)] \\ &= \alpha [\rho^3 \cos^3 \theta + \rho^3 \cos^3 \varphi] \\ &= \alpha \rho^3 (\cos \theta + \cos \varphi) \cdot \\ &\quad (\cos^2 \theta - \cos \theta \cdot \cos \varphi + \cos^2 \varphi) \\ &= \alpha \rho^3 (\cos \theta + \cos \varphi) (1 - \cos \theta \cdot \sin \cdot \theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \alpha \rho^3 (\cos \theta + \cos \varphi) - \alpha \rho^3 (\cos \theta + \cos \varphi) \cdot \\ &\quad \cos \theta \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

显然,上式中第一项为彗差项,第二项为彗差项乘以一项因子。可见由三次位相板产生的波像差主要是彗差,故可以考虑用球面透镜形成的彗差来补偿。彗差表示轴外物点宽光束经光学系统成像后失对称的情况,因此,我们可以用一组球面透镜,通过调节其倾斜和偏心,使之产生的光程差与三次位相板的面形相补偿,从而形成我们需要的零位补偿器。

### 3 零位补偿器的设计

图 2 是设计的检测系统的光路图,干涉仪的球面波经过零位补偿器,产生我们需要的非球面波前,去补偿三次位相板的波像差,再经过一块平面反射镜原路返回,并进入干涉仪,作为检测光波。参考光波由干涉仪本身提供。

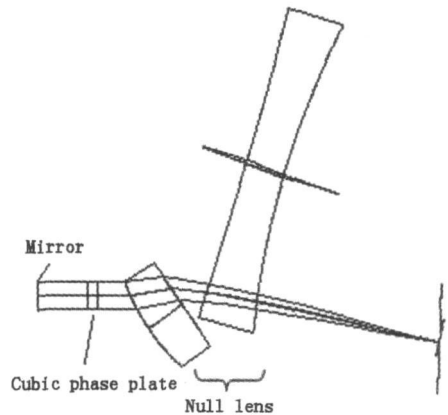


图 2 检测系统的光路图

Fig 2 optical design of the test system

图 3 是该检测系统的三维效果图。表 1 是与光学系统对应的具体参数。其中设计波长为  $632.8\text{ nm}$ ,该系统的设计难点是优化系统的倾斜和偏心。由波前图(如图 4 所示)可以看出系统的残余波像差仅为  $0.0374 \lambda$ ,接近  $1/30$  波长。

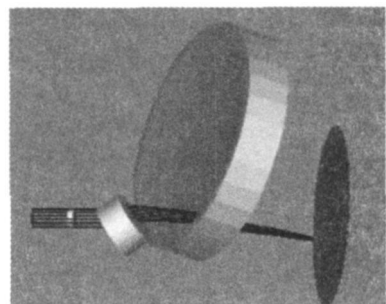


图 3 检测系统的三维效果图

Fig 3 effect drawing of the test system

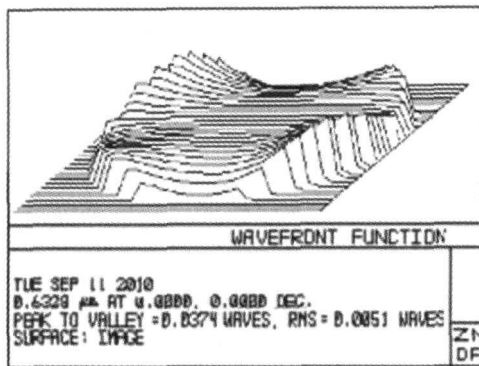


图 4 波前图

Fig 4 wavefront map

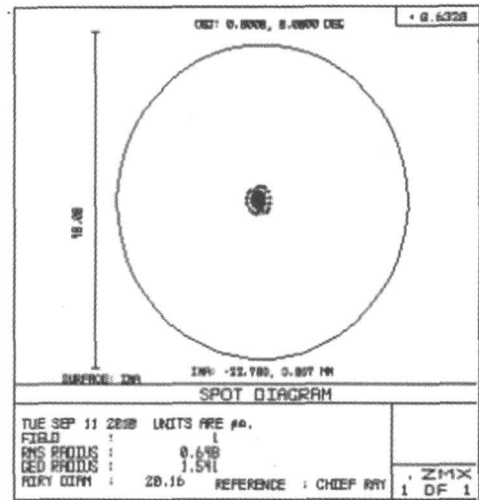


图 5 点列图

Fig 5 spot diagrams

图 5 为设计的检测系统的点列图, 由点列图可以看出, 零位补偿器的设计效果良好。检测系统的具体参数如表 1 所示。

表 1 系统的具体参数

Tab 1 the parameters of the system

	Surf Type	Radius	Thickness	G lass	D en cen ter X	D en cen ter Y	T il t X	T il t Y
OBJ	Standard	Infinity	Infinity					
STO	Standard	Infinity	10					
2	Standard	Infinity	1.7	PMMA				
3	Ext polynomial	Infinity	10					
4	Coordinate break		0.0		0.181	-6.324	-34.175	-1.945
5	Standard	40.078	8	K9				
6	Standard	587.723	20					
7	Coordinate break		0.0		-0.181	6.324	34.175	1.945
8	Coordinate break		0.0		45.327	10.230	27.336	25.688
9	Standard	-648.247	8	K9				
10	Standard	162.011	30					
11	Coordinate break		0.0		-45.327	-10.230	-27.336	-25.688
MA	Standard							

#### 4 实验

对于非旋转对称的三次位相波前编码板的检测, 我们利用 Zygo 干涉仪搭建了简易的实验平台 (如图 6 所示), 对一个直径为 13 mm, 面形为  $z = \alpha(x^3 + y^3)$ ,  $\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$  的三次位相波前编码板。检测结果如图 7 所示。

从检测结果可以看出, 我们获得了  $0.470 \lambda$  的 PV 值,  $0.049 \lambda$  的 RMS 值。而待检测的三次位相板 (PMMA 材料) 的当时加工时所提出的精度是小于  $0.5 \lambda$ 。

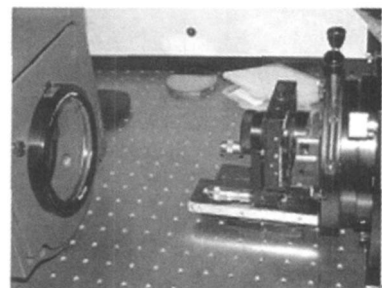


图 6 检测系统的实物照片

Fig 6 the photograph of the test system

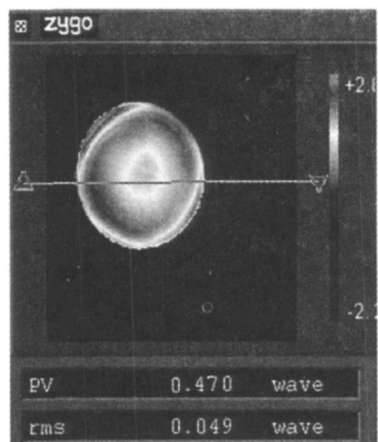


图 7 待检三次位相板的二维面形结构图

Fig 7 the 2D surface profile of the cubic surface under test

## 5 结论

对于非旋转对称的三次位相波前编码板的检测,巧妙的利用了其面形与彗差项的相似性,设计了一种由球面镜组成的零位补偿器,并给出了设计的具体实例。为非旋转对称的光学元件的面形检测提供了一个思路。

## 参考文献:

- [1] Chen Chu, Huang Chunhui. Improved version of coherent light detection system design [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 580-582 (in Chinese)  
陈楚,黄春晖.改进型相干光检测系统的设计[J].激光与红外,2008,38(6):580-582
- [2] Wyant J.C., Bennett V.B. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts [J]. Applied Optics, 1972, 11(12): 2833-2839
- [3] Liu Hua, Lu Zhengwu, Li Fengyou, et al. Using curved hologram to test large-aperture convex surface [J]. Opt Express, 2004, 12(14): 3251-3255
- [4] Kim Yeon Soq, Kim Byoung Yoon, Lee Yun Woo. Design of null lenses for testing of elliptical surfaces [J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3215-3219
- [5] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 220-221. (in Chinese)  
郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999:220-221.
- [6] D Malacara. Optical shop testing [M]. John Wiley & Sons Inc. Publication, 1992: 194