

# 计算全息法测量长焦透镜面形和焦距

岳巾英<sup>1,2</sup>, 刘 华<sup>1</sup>, 许文斌<sup>1</sup>, 王泰升<sup>1,2</sup>, 卢振武<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了同时对长焦透镜的面形和焦距进行高精度检测, 提出在 Zygo 干涉仪的球面光路中加入一个二元衍射元件作为检测件的计算全息法。首先对计算全息法检测长焦透镜的面形和焦距进行了理论推导, 并给出焦距误差公式。在 Zemax 中使用在平面基底上制作的二元衍射元件对一个长焦透镜的面形和焦距进行了模拟检测, 其中对该长焦透镜面形的干涉检测 PV 值为  $0.0034\lambda$ , 对焦距的检测精度为  $-0.11\%$ 。最后详细分析了两类误差对检测结果的影响, 其中光学元件的位置误差影响不超过  $0.1\lambda$ ; 二元衍射元件的制造误差影响约  $0.01\lambda$ , 在具体制造过程中, 其径向位置误差和台阶误差可分别在  $2\mu\text{m}$  和  $5\text{nm}$  之内。在综合考虑各项误差的情况下, 该方法的检测精度仍然可控制在  $2\lambda/25$  之内。

**关键词:** 光学设计; 计算全息法; 长焦透镜; 光学面形检测

中图分类号: O438.1; TH703 文献标识码: A

## Measurement of optical surface and foci of long focal length lens by CGH

YUE Jin-ying<sup>1,2</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>, XU Wen-bin<sup>1</sup>, WANG Tai-sheng<sup>1,2</sup>, LU Zhen-wu<sup>1\*</sup>

(1. *Opto-electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to obtain a high testing precision in the measurement of optical surfaces and focal length of a long focal length lens at the same time, the Computer-generated Holograms (CGH) method was presented by adding a diffractive optical element in the spherical optical path. Firstly, the optical surface test formula and the focal length test formula of the long focal length lens were derived, and the error of the focal length test formula was analyzed. In Zemax, the optical surface and focal length of a lens were tested with the CGH, which should be etched on a flat glass substrate, the PV value of the optical surfaces interference pattern is  $0.0034\lambda$ , and the test precision of the focal length is  $-0.11\%$ . Finally, the influences of two errors on the test result were analyzed particularly, and the influence is no more than  $0.1\lambda$  for the position error of the two optical elements and about  $0.01\lambda$  for the fabrication error of CGH, where the radial position error is about  $2\mu\text{m}$  and the step error is about  $5\text{nm}$ . Considering the effects of all test errors, the test precision of the method can be

controlled within  $2\lambda/25$ .

**Key words:** optical design; Computer-Generated Holograms (CGH); long focal length lens; optical surface testing

## 1 引言

长焦透镜在天文光学系统、空间遥感相机以及激光核聚变驱动器等领域有着重要的应用价值,其面形精度是透镜球面参数的重要标志,而精确测定其焦距,则可以保证探测器、空间滤波器或其它元件在其焦点位置上的准确安放。因此,对长焦透镜面形精度及焦距的检测具有重要意义。

一般来说,任意曲率的凹球面都可以用干涉仪的球面光直接进行面形检测,但对于大曲率半径的凸球面则很难用球面光对其进行检测<sup>[1]</sup>。长焦透镜焦距的检测有很多种方法<sup>[2-5]</sup>,如平行光管检测法和光栅检测法。采用平行光管检测法测量长焦透镜时(1 000 mm 以上),仅平行光管的焦距就要 5 000 mm 以上,这将导致测试系统平台过长,测试系统操作复杂且精度较低;光栅检测法是将被测透镜的前焦面上放置衍射光栅,通过探测光栅不同衍射级次成像的方法使探测精度达到 0.1%,但该方法同样存在着测试距离过长的问題。

本文研究了在球面光入射下,仅采用一个二元反射衍射元件即可同时检测长焦透镜面形和焦距的计算全息法,该方法具有所需实验平台短,测试光路简单,测量精度高等特点。文中对一个厚度为 1 mm,口径为 50 mm,焦距约为 2 594.952 mm 的平凸透镜进行了模拟检测,并对检测误差进行了详细分析,从理论上得出了该方法的可行性。

## 2 长焦透镜面形及焦距检测

对长焦透镜面形和焦距的检测光路如图 1 所示,使用干涉仪的标准镜头提供的球面光对透镜进行检测。在焦点后适当位置处放置被测长焦透镜,衍射元件作为检测元件位于被测透镜一定距离处,被测透镜和衍射元件要与光轴保持同轴。

球面光通过被测透镜后经衍射元件的 +1 级反射衍射,使光线沿原路返回干涉仪中,从而与从标准镜头返回的参考光束在干涉仪中发生干涉,形成干涉条纹。下面两小节内容将截取图 1 中的焦点及其以后部分,从不同角度对该光路进行分析,从而分别得到该透镜的面形和焦距信息。

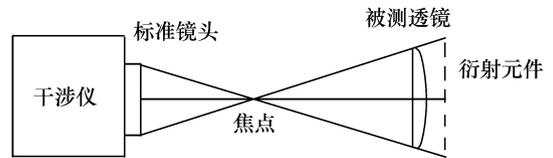


图 1 计算全息法检测长焦透镜光路

Fig. 1 Configuration for measurement of lens with long focal length by CGH

### 2.1 面形检测原理

首先从位相角度对被测透镜的面形检测进行理论分析,以求出检测件的位相函数,便于加工制作所需的二元面。

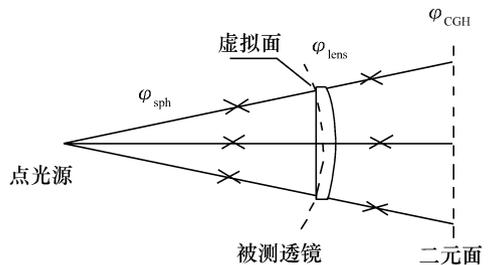


图 2 CGH 位相检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of phase measurement by using CGH

点光源发出的球面光,经过被测透镜后,出射在一个在平面反射镜基底上加工的二元衍射面上,使其 +1 级反射衍射光线沿原路返回,再次通过被测透镜后,和原来的球面光重合。如图 2 所示,把光路分为两部分,其中虚拟面表示的是一个理想球面,假设点光源发出的球面光在虚拟面处

发生反射,光线原路返回,作为参考光;真实光路部分作为被测光路。则两路光线的位相公式如下:

$$\varphi_{\text{test}} = \varphi_{\text{sph}} + \Delta\varphi_{\text{len}} - 2\varphi_{\text{base}} + m\varphi_{\text{CGH}} + \Delta_m\varphi_{\text{len}}, \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{ref}} = \varphi_{\text{sph}} - 2\varphi_{\text{sph}} = -\varphi_{\text{sph}}, \quad (2)$$

其中  $\varphi_{\text{base}}$  为平面基底反射位相,  $m$  为反射衍射光线级数,  $\Delta_m\varphi_{\text{len}}$  为  $m$  级反射衍射光线再次通过被测透镜的位相函数。当参考光束和被测光束的位相相等,主反射衍射级次  $m = 1$  时,二元面的位相为:

$$\varphi_{\text{CGH}} = 2\varphi_{\text{base}} - 2\varphi_{\text{sph}} - \Delta\varphi_{\text{len}} - \Delta_1\varphi_{\text{len}}, \quad (3)$$

理想检测光路沿原路返回,可得:

$$\varphi_{\text{CGH}} = 2\varphi_{\text{base}} - 2\varphi_{\text{sph}} - 2\Delta\varphi_{\text{len}}, \quad (4)$$

通过式(4)可以看出当  $\varphi_{\text{CGH}} = 0$ ,即不用二元面检测时,相当于使用一个球面反射镜进行检测。当  $\varphi_{\text{base}} = 0$ ,也就是在平面基底上制作二元面,则二元面的位相为:

$$\varphi_{\text{CGH}} = -2(\varphi_{\text{sph}} + \Delta\varphi_{\text{len}}). \quad (5)$$

## 2.2 焦距检测原理

由于长焦透镜的焦距比较长,当其厚度相对于焦距可以忽略时,可视其为薄透镜。从光学元件成像的角度对图3进行分析,在距离物点  $O$  (即点光源)的  $a$  处放置被测透镜,在距离被测透镜后  $b$  处放置衍射元件。物点经过被测透镜和衍射

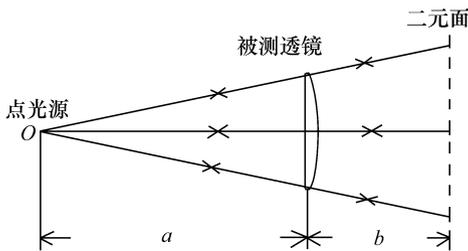


图3 CGH法检测焦距原理图

Fig. 3 Schematic diagram of focal length measurement by using CGH

元件的 +1 级反射衍射后分别成像,设计选择合适的二元面参数和  $b$  值,使像点位于物点处,也就是使物像重合。只有在物像重合的情况下,才能从干涉仪中得到良好的干涉条纹,再次证明该方法对长焦透镜的焦距检测和面形检测是一致

的。

下面进行具体成像分析:物点  $O$  先经过被测透镜成像,像点设为  $S$ ,  $S$  经过衍射元件的 +1 级反射衍射后,成像为  $S'$ 。  $S'$  再次经过被测透镜成像于  $O'$  处,使  $O$  和  $O'$  重合。其中关键是物点  $O$  经过被测长焦透镜成像后其虚像位于二元面 +1 级反射衍射的曲率中心,这样保证了入射光线在衍射元件处能够沿原路返回。可以用下面的公式描述成像过程:

第一次经薄透镜成像公式:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \quad (6)$$

经衍射元件反射成像公式:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}, \quad (7)$$

第二次经薄透镜成像公式:

$$\frac{1}{d'} - \frac{1}{d} = \frac{1}{f'}, \quad (8)$$

其中有两个成像转换为

$$\begin{aligned} s &= l' - b, \\ d &= -(s' + b), \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $r$  为衍射元件的 +1 级反射衍射曲率半径。带入图3中的参数:  $l = -a$  ( $a$  为正值),通过计算可以得到:

$$f' = \frac{a(b+r)}{a+b+r}, \quad (10)$$

式(10)中焦距的误差是由3个直接测量量  $a$ 、 $b$  和  $r$  的测量误差所决定的。设  $c = b + r$ ,则上式可变为:

$$f' = \frac{a \cdot c}{a + c}, \quad (11)$$

则系统误差可以表示为:

$$\Delta f' = \frac{c^2}{(a+c)^2} \Delta a + \frac{a^2}{(a+c)^2} \Delta c. \quad (12)$$

从误差分析可以看出,透镜焦距  $f'$  和距离  $a$  及中间量  $c$  的比值越小,系统误差也越小。因为距离  $a$  决定系统的测量长度和测量光路的亮度,而  $a$  值越小越好。因此,在保证检测质量的前提下,应选择合适的  $a$  值。

## 3 Zemax 模拟检测

对于同一个被测元件,如式(10)所示,焦距

为3个变量的函数,因此各个检测参数都不是固定不变的。首先根据检测的要求,选择便于加工的衍射元件,当检测元件的位相函数确定后,以另外两个距离  $a$ 、 $b$  作为变量,进而选择合适的数值,使两个元件具有可调节性。对引言中所述的长焦

透镜进行检测,设计时既要保证检测系统长度合适,衍射元件口径尽量小,又要保证衍射元件的可制作性<sup>[6,7]</sup>。检测波长  $\lambda_c = 632.8 \text{ nm}$  时,该长焦透镜焦距和面形的检测数据如表1所示,其中第三面 Binary2 中的反射衍射主级次为 +1 级。

表1 计算全息模拟检测结构参数

Table 1 Structure parameters of system for CGH test

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass
OBJ	Standard	Infinity	1 150	
STO	Standard	Infinity	1	BK7
2	Standard	-1 336.9	218.017	
3	Binary 2	Infinity	0	
4	Standard	Infinity	-218.017	MIRROR
5*	Standard	-1336.9	-1	BK7
6*	Standard	Infinity	-1 150	
IMA	Standard	Infinity		

Extra data editor

Binary 2	Max Term	Norm Radius	Coeff . on $p^2$	Coeff . on $p^4$	Coeff . on $p^6$
3	3	110	$-5.257\ 874 \times 10^4$	140.110 517	-0.619 822

由于平面基底不提供光焦度,该衍射元件的光焦度  $f_b$  由其位相函数的二次项系数决定,通过上面 Extra data editor 中的数据可计算检测元件的曲率半径:

$$r = -2 \times f_b = 2 \times \frac{\pi \times 110^2}{\lambda_c \times 52\ 578.74} = -2\ 285 \text{ mm}$$

### 3.1 面形和焦距模拟检测结果

该系统中衍射元件和被测件之间的距离

$b = 218 \text{ mm}$ ,该距离选择较为合理,不仅提供了充分的调节空间,且使衍射元件具有较小的口径 ( $D < 60 \text{ mm}$ )。在理想参考光束和衍射元件制作理想的情况,通过表1数据所得干涉图的干涉PV值为  $0.003\ 4\lambda$ ,由于检测光两次通过被测透镜,其真实波前为干涉图示值的一半,如图4所示。鉴于计算全息法可构建出任意所需位相,其在薄透镜面形检测方面具有很大的优势。

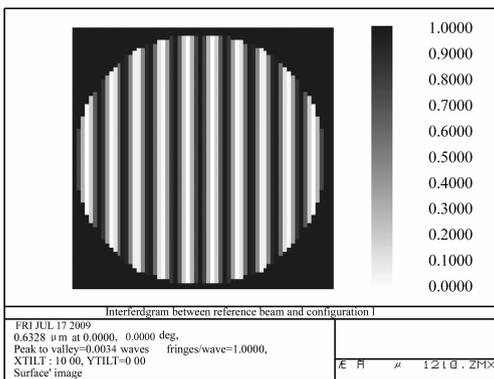


图4 计算全息检测干涉图

Fig. 4 Interferogram tested by CGH

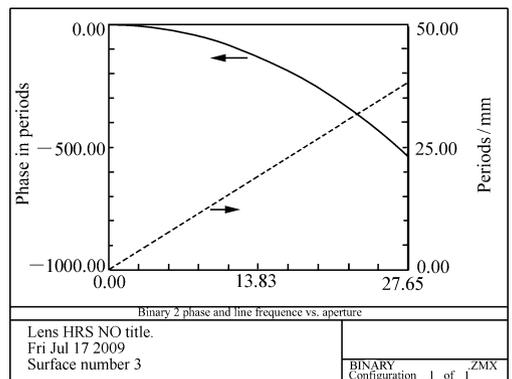


图5 二元面位相分配

Fig. 5 Phase distribution of binary 2 surface

衍射元件的基底为平面,在最大半口径 27.65 mm 处每毫米大约有 38 个环带周期,容易制作。使用球面光检测的优点在于,用衍射元件作为检测件时,可在焦点处对球面光进行滤波,以达到更好的检测效果。经验证,图 5 所示衍射面的非主衍射级次对检测结果几乎没有影响,不需要考虑。

检测元件 Binary2 的位相分布如图 5 所示。

将表 1 中的数据:  $a = 1\ 150\ \text{mm}$ ,  $b = 218.017\ \text{mm}$ , 和计算得到的衍射元件曲率半径  $r = -2\ 285\ \text{mm}$ , 带入式(10)可以计算出该长焦透镜的焦距:

$$f' = \frac{1\ 150 \times (218.017 - 2\ 285)}{1\ 150 + 218.017 - 2\ 285} = 2\ 592.2\ \text{mm}$$

通过与被测薄透镜的焦距理论值相比,该方法的焦距测量精度可达  $-0.11\%$ 。

用计算全息法可同时检测长焦透镜的面形和焦距,该方法仅需一个检测元件,光路简单,且对

面形的检测精度和焦距计算的精度都非常高。

### 3.2 误差分析

影响测量结果的主要有两种误差:光学元件的位置误差和衍射元件的制造误差。其中被测元件和检测元件的位置误差可细分为实验前的定位误差和实验后的读数误差,鉴于对  $a$  和  $b$  的读数误差可以控制在  $0.01\ \text{mm}$ , 而读数误差只影响焦距计算,下面重点分析光学元件的定位误差和衍射元件的制造误差对测量所造成的影响。

#### 3.2.1 定位误差

当被测透镜和衍射元件存在定位误差  $\Delta a$ 、 $\Delta b$  时,表 2 列举了不同组合下两个误差变量对干涉图的影响,当  $\Delta = 0.01\ \text{mm}$  时,定位误差对干涉图的影响很小;  $\Delta = 0.1\ \text{mm}$  时,被测透镜的定位误差对干涉图影响较大;使用高精度导轨和千分尺,可将  $a$  和  $b$  的位置测量精度控制在  $0.01\ \text{mm}$ 。

表 2 定位误差对干涉图影响

Tab. 2 Relation between positioning error and interferogram

$\Delta a/\text{mm}$	0.01	0.01	0.01	0.1
$\Delta b/\text{mm}$		0.01	-0.01	0.1
PV/ $\lambda$	0.008 1	0.004 6	0.006 5	0.074 7

除了位置误差,在实际检测时,被测透镜和衍射元件也会存在一定的偏心和倾斜误差,这些调整误差对干涉检测也有影响。当被测透镜存在偏心  $E_a = 0.5\ \text{mm}$ 、倾斜  $T_a = 0.1^\circ$ , 凹球面反射镜存在偏心  $E_b = 0.5\ \text{mm}$ 、倾斜  $T_b = 0.1^\circ$  时,干涉图的 PV 值变化如表 3 所示,所得最差组合的干涉 PV 值为  $0.082$ , 如图 6 所示。由于相对倾斜误差对干涉图的影响最大,实验时,可使用五维调节架微调两个元件的倾斜量,以取得最佳干涉效果。

#### 3.2.2 衍射元件误差

二元衍射元件的制造误差可分为两种:径向位置误差和台阶深度误差。其中影响最大的径向位置误差将导致刻画同心环线偏离正确的位置,直接影响再现波面的质量,降低检测精度,而本文的实验条件对二元衍射元件的位置误差可控制在  $2\ \mu\text{m}$  以内,对于周期在  $200 \sim 4\ 000\ \mu\text{m}$  内二元衍

射元件,由位置误差引入的波像差  $< 0.01\lambda$ , 完全可以满足要求。台阶深度误差可控制在  $5\ \text{nm}$  以内,该项误差对检测结果影响更小。

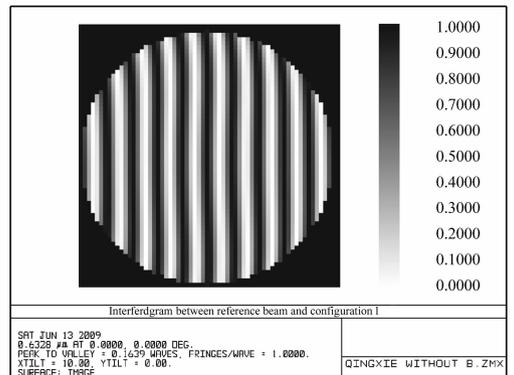


图 6 考虑最大调整公差干涉图

Fig. 6 Intergram including largest adjustment errors

表3 偏心、倾斜误差对干涉测量影响

Tab.3 Effect of eccentric and tilt errors on interferometry

$E_a/\text{mm}$	$E_b/\text{mm}$	$T_a/(\text{°})$	$T_b/(\text{°})$	PV/ $\lambda$
0.05	0.05	0.1	0.1	0.033
0.05	-0.05	0.1	0.1	0.032
0.05	0.05	-0.1	0.1	0.082
-0.05	0.05	0.1	-0.1	0.082

综上所述,在考虑各种误差影响后,该检测方法对透射波前的检测精度在最差情况下仍可达到 $2\lambda/25$ 。

用计算全息法同时检测长焦透镜的面形和焦距的方法,由于该方法仅需一个检测元件(反射-衍射镜),具有光路简单、操作方便、所需实验距离短以及检测精度高等优点。

## 4 结 论

针对被测透镜具有大 $F$ 数的特点,研究了应

### 参考文献:

- [1] Zygo Corporation. *Typical Interferometer Setups*[M]. Middlefield:Zygo Corporation,2001.
- [2] 苏大图. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.  
SU D T. *Optics Test Technology*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1996. (in Chinese)
- [3] HOWLAND B,PROLL A F. Apparatus for the accurate determination of flange focal distance[J]. *Appl. Opt.*,1970,11:1247-1251.
- [4] BERNARDO L M,SOARES O D D. Evaluation of the focal distance of a lens by talbot interferometry[J]. *Appl. Opt.*,1988,273:296-301.
- [5] CHANG CH W,SU D CH. An improved technique of measuring the focal length of a lens[J]. *Opt. Commun.*,1989,73(4):257-262.
- [6] 刘华,卢振武,李凤有,等. 用于非球面检测的球面计算全息图特性分析[J]. 光电工程,2004,7:38-41.  
LIU H,LU ZH W,LI F Y,et al. . Analysis for property of CGH on spherical surface used for aspheric surface testing[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2004,7:38-41. (in Chinese)
- [7] 卢振武,刘华,李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学精密工程,2004,12(6):555-559.  
LU ZH W,LIU H,LI F Y. Testing aspheric surface by using curved CGH[J]. *Opt. Precision Eng.*,2004,12(6):555-559. (in Chinese)

作者简介:岳巾英(1983—),女,河南许昌人,博士研究生,主要从事光学设计与光学检测等方面的研究。

E-mail:yuejy8311@yahoo.com.cn

卢振武(1955—),男,吉林大安人,博士,研究员,主要从事衍射光学、非成像光学等方面的研究。

E-mail:luzhenw55@yahoo.com.cn