

文章编号: 1002-2082(2006)SO-0065-03

# 非球面波像差的检测技术

王生云, 郑 雪, 张 玫

(西安应用光学研究所 国防科工委光学计量一级站, 西安 710065)

**摘要:** 介绍了非球面波像差测量的原理和装置。对于柱面检测, 以 GPI-HS 型数字干涉仪为主机实现了移相干涉术的柱面波像差检测。采用绝对检验法对标准柱面镜进行了标定。为了检测抛物面、椭球面和双曲面镜, 在干涉仪工作光路中加入一个标准辅助反射镜, 组成自准直系统, 采用干涉法中的无像差点法实现对非球面波像差的检测。若这种测量方法与移相式数字干涉原理相结合, 测量精度更高, 数据信息量更大, 测量范围更广, 同时还可消除系统误差和调整误差。

**关键词:** 非球面检测; 波像差; 无像差点法

中图分类号: TN215

文献标志码: A

## Testing technology for aspheric wavefront aberration

WANG Sheng-yun, ZHENG Xue, ZHANG Mei

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The principle and system of aspheric wavefront aberration measurement are introduced. The cylindrical wavefront aberration measurement was realized mainly by GPI-HS interferometer with the phase-shift interferometry. The cylindrical standard mirror was calibrated by the aid of the absolute testing method. A standard accessorial reflecting mirror was incorporated into the beam path of an interferometer to build up a auto-collimating system for measuring the aspheric wavefront aberration of paraboloidal, ellipsoidal and hyperbolic mirrors with the method of aberrationless point. This method will have the characteristics of higher precision, bigger data-information capacity, larger measurement range, and can remove system error and adjustment error if it is combined with the phase-shift interference principle.

**Key words:** aspheric measurement; wavefront aberration; aberrationless method

## 引言

非球面检测技术是制约光学非球面应用的关键技术之一。目前非球面面形的计量检测主要采用机械扫描法、无像差共轭点法、补偿器法和全息法。机械扫描法实用可靠, 但数据点少, 精度低, 且易划伤被测样品表面。补偿器法不需要制作大口径辅助反射镜, 但需加工、设计高质量的补偿镜, 并且对非球面需要设计专门的补偿器。全息法需要一个标准非球面镜(或要求计算机计算出全息图), 且在检测

过程中需要准确地定位。鉴于此, 本文提出用无像差点法来实现非球面波像差的检测。它具有测量精度高, 数据信息量大, 测量范围广, 可消除系统误差和调整误差的优点, 是目前非球面检测的首选方法。

## 1 测量原理

图 1 为 GPI-HS 型激光干涉仪的光路图。在该图中标准透射镜与压电陶瓷移相器(PZT)相连, 驱

动电路驱动参考镜产生波长量级的光程变化,使干涉场产生变化的干涉图形。参考波面和被测波面的方程分别为

$$\begin{aligned} E_{\text{参考}}(x,y) &= ae^{2ikl} \\ E_{\text{检测}}(x,y) &= be^{2iklW(x,y)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $b$  分别为波面的振幅;  $k=2\pi/\lambda$ ;  $l$  为参考光程;  $W(x,y)$  为被测件的波像差函数。两波面相遇后将产生干涉,形成干涉图,其光强为

$$I(x,y,l) = a^2 + b^2 + 2ab \cos 2k[W(x,y) - l] \quad (2)$$

图 1 中的压电陶瓷推动参考镜作匀速平移,使参考面的相位匀速变化,于是在参考波面相位匀速变化的一定范围内,光电探测器接收到干涉场中某点  $(x,y)$  处的光强信号代表了该点光强的积分平均值。

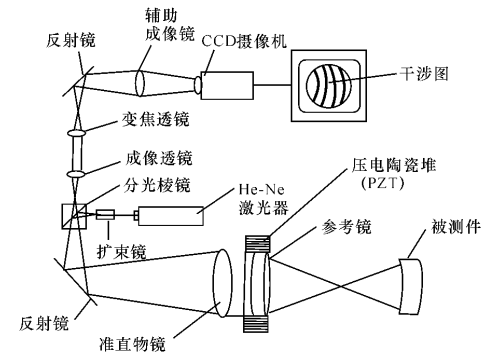


图 1 GPI-HS 干涉仪测量非球面(柱面)波像差的光路图

Fig. 1 Beam path for measurement of aspherical (cylinder) wave aberration with GPI-HS interferometer

如果光电探测器在一个周期内采样的次数  $n=4$ , 且按  $1/4$  周期作等间隔采样, 4 次采样的光强分别为  $I_1, I_2, I_3$  和  $I_4$ 。则可求得干涉场中  $(x,y)$  点处的波差函数

$$W(x,y) = \frac{1}{2k} \tan^{-1} \left( \frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_3(x,y) - I_1(x,y)} \right) \quad (5)$$

通常用波面的峰谷值(P-V)和标准偏差值(RMS)来表征被检波面的质量:

$$PV = W_{\max}(x,y) - W_{\min}(x,y) \quad (6)$$

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [W_i(x,y) - \bar{W}(x,y)]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $W_{\max}(x,y)$  和  $W_{\min}(x,y)$  分别指波面上的最大和最小波差值;  $\bar{W}(x,y)$  是指  $N$  个坐标上波差值  $W(x,y)$  的平均值。

## 2 装置构成

非球面波像差校准装置是利用移相式数字干涉仪测试原理并整合精密机械、电子技术及计算机技术的光学测试系统。该装置主要包括硬件和软件两大部分。硬件系统包括 GPI-HS 型数字干涉仪主机、图像采集系统 (CCD 摄像机、图像采集卡、监视器)、标准辅助反射镜、非球面反射镜、被检非球面专用调整架、计算机及辅助设备。其工作原理框图如图 2 所示。

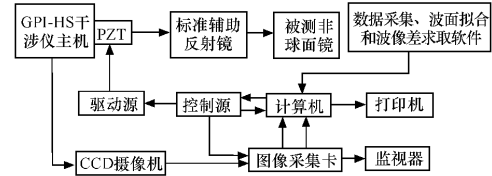


图 2 非球面波像差校准装置工作原理框图

Fig. 2 The principle diagram of calibration equipment for aspheric wave aberration

GPI-HS 数字干涉仪以等厚干涉为基础, 借助干涉条纹实时扫描技术, 用干涉图光强值进行相位计算, 用 CCD 摄像机完成干涉图高速采集。该干涉仪具有较高的相位分辨率和空间分辨率, 对随机噪声有很强的抑制能力, 可消除测量过程中的随机误差及系统误差对测量结果的影响。借用标准辅助反射镜构成自准直光路(测试光路), 形成干涉条纹, 实现非球面波像差测量。

## 3 非球面波像差的测量方法

### 3.1 柱面镜的检测

柱面镜的检测是以 GPI-HS 型数字干涉仪为主机完成移相干涉术的柱面波像差检测的。为了消除系统误差, 充分提高标准装置的测量不确定度, 满足实际计量工作的需求。柱面波像差计量标准器的标定采用绝对检测方法。图 3 给出了装有柱面透镜和被测试件的 GPI-HS 干涉仪, 用该系统共完成了 3 次测试。

1) 常规检测是利用标准参考平面和被测柱面镜表面反射的两束光发生的相干涉, 检测由此形成的干涉图;

2) 旋转测试是将测试柱面旋转  $180^\circ$ , 其它与 1) 相同;

3) 用空心直角反射棱镜将通过柱面透镜的柱

面会聚光束旋转180°,再沿对称光轴的空间位置返回,形成干涉图。

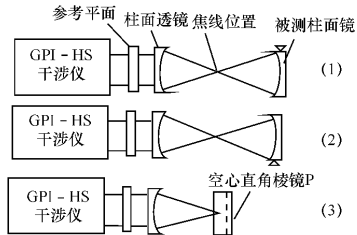


图3 柱面绝对检测系统示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of absolute calibration system for cylindrical lens

这3次测试干涉图所表征的波差分别为 $W_1(r, \theta)$ ,  $W_2(r, \theta)$ 和 $W_3(r, \theta)$ ,通过计算可获得被测柱面波差为

$$W_T(r, \theta) = \frac{1}{4} \{ [W_1(r, \theta) + W_2(r, \theta + \pi)] - [W_3(r, \theta) + W_3(r, \theta + \pi)] + 2[W_P(r, \theta) + W_P(r, \theta + \pi)] \} \quad (9)$$

这其中的空心直角棱镜P的偶对称误差将带入最终的测试结果中。

### 3.2 抛物面、椭球面和双曲面的检测

抛物面、椭球面和双曲面等二次曲面均有两个无像差的共轭点(焦点),即从其中一个焦点发出的全部光线从表面反射后,必然会聚到另一个焦点上或从焦点发散出去(若为虚焦点)。图4是抛物面、椭球面和双曲面镜波像差检测光路图。

对抛物面、椭球面和双曲面镜的检测,通常是在干涉仪的工作光路中加入一个标准辅助反射镜(经过检定的高精度标准平面或球面镜)组成自准自系统,以实现非球面波像差的检测。

来自GPI-HS干涉仪主机的光线经过标准辅助反射镜后到达被测非球面,经被测非球面镜反射后的光波沿原路返回(作为检测光波),与干涉仪中的参考波前相干涉形成干涉条纹。通过计算机系统控制CCD摄像机进行干涉条纹采样,数字化处理和分析后可得到非球面波像差。

若光线被表面反射1次,则有约放大2倍的表

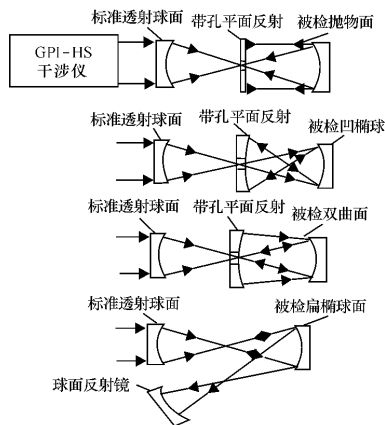


图4 非球面波像差检测光路图

Fig. 4 Beam-path diagram of aspherical wave aberration measurement

面面形偏差被带入波前变形中,实际情况是光线在被检测非球面表面反射2次,在辅助球面反射镜表面反射1次,这样被检非球面的表面面形偏差将放大4倍,而辅助反射镜的偏差仅被放大2倍。由此可看出,利用这种方法检测非球面镜,灵敏度较高。

## 4 结束语

利用激光干涉仪实现了非球面检测。柱面镜的检测是通过与参考柱面相比较实现的。对柱面波像差计量标准器的标定采用了绝对检验方法。抛物面、椭球面和双曲面镜的检测采用无像差点法来实现。这种检测方法不仅可以对各种非球面波像差进行检测,而且便于实现数据的量传。

### 参考文献:

[1] Stahl H P. Aspheric surface testing techniques[J]. SPIE, 1990, 1332:66-69.  
 [2] 吴震. 光干涉测量技术[M]. 北京:中国计量出版社, 1995:230-235.  
 [3] 马拉卡拉 D. 光学车间检验[M]. 白国强,薛君敖,洪涛,等译. 北京:机械工业出版社, 1983:397-416.  
 [4] 潘君骅. 非球面光学系统设计、加工、检验的综合考虑[J]. 光学技术, 2001, 27(6):566-567.