

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 大口径高次、离轴非球面干涉测量中 投影畸变的标定方法

李锐钢<sup>1,2</sup>, 郑立功, 薛栋林, 张学军

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130031;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了运用干涉仪的 Fiducial 功能确定干涉仪 CCD 的测量坐标系与非球面镜面坐标系的对应关系, 然后对两者关系进行正交化拟合, 从而标定出非球面干涉检验中的投影畸变, 并用于某高次、离轴非球面进行干涉检验中的投影畸变标定, 拟合精度为  $1.964\ 53\ \mu\text{m}$ 。根据标定结果对干涉测量面形图重构, 进行了数控抛光实验, 最终面形精度达到均方根值  $\lambda/20$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ), 证明拟合精度完全满足数控抛光的要求。

**关键词:**非球面检验; 干涉术 Fiducial 功能; 投影畸变; 干涉图重构; 标定

中图分类号: TQ171.65; O436.1 文献标识码: A

## Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture

LI Rui-gang<sup>1,2</sup>, ZHENG Li-gong, XUE Dong-lin, ZHANG Xue-jun

(1. *Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*  
2. *Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A calibration method was put forward for the projection distortion in interferometric testing of asphere surface. The method uses the Fiducial function of the interferometer to determine the relationship between the testing coordinate of the interferometer CCD and the coordinate of asphere mirror, and make it orthogonalize fitting to calibrate the projection distortion of an off-axis and high order aspheric surface in interferometric testing phase, the fitting precision is  $1.964\ 53\ \mu\text{m}$ . The reconstructed interferogram was used to carry out the computer control polishing experiment, the final precision of surface shape is rms  $\lambda/20$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ). The experimental results show that the fitting precision satisfies the requirement of computer control polishing.

**Key words:** aspheric surface testing; interferometry Fiducial function; projection distortion; interferogram reconstruction; calibration

## 1 引言

近 20 年来,特别是上世纪 90 年代之后,随着航空航天及军用光学的迅速发展,大口径光学非球面的需求越来越多,因此也相应的带动了光学非球面的加工和检测技术研究的快速发展,国内外众多研究机构及高校都开展了非球面的相关研究<sup>[1-4]</sup>。光学设计中采用非球面元件可以提高光学系统的性能并减少光学元件的数量,进而减轻光学系统的重量,减小光学系统的体积,同时也可以降低光学系统的复杂程度。非球面光学元件之所以具有这些优点,是因为它在光学设计中比起球面元件来说能更有效地校正像差。虽然非球面元件有如此多的优点,但是由于它特殊的几何形状决定了非球面加工和检测方法不同于球面元件,所以无论是制造难度还是制造成本都要远远高于球面元件<sup>[5]</sup>。

目前大口径非球面的加工方法一般采用 CCOS 技术,CCOS 技术的思想是由美国 Itek 公司的 W. J. Rupp 在 70 年代初期最先提出的<sup>[6]</sup>。它根据定量的面形检测数据,建立加工过程的控制模型,用计算机控制一个小磨头(直径通常小于工件直径的 1/4)对光学零件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量。

CCOS 技术非球面抛光阶段的检验一般采取零位补偿干涉检验,非球面的零位补偿干涉检验要使用一个专门设计的零位补偿器以产生非球面波面与待检非球面反射后的波面进行干涉,获得带有镜面误差的干涉条纹<sup>[7]</sup>。由于零位补偿器以及干涉仪(常用菲索型)在准直、CCD 成像过程中引入的误差,以至于干涉检验的 CCD 测量坐标系与非球面镜面坐标系之间的对应关系变的很复杂,把这种非线性的对应关系称作投影畸变。根据 CCOS 技术原理,干涉检验的测量结果要用于指导光学加工的进行,所以为了达到精确修正面形,必须对投影畸变进行标定,并根据标定结果对干涉测量结果进行面形重构。本文提出了一种新的很实用的标定投影畸变的方法,进行数据拟合并对干涉测量结果进行了面形重构计算机模拟,同时进行了抛光实验,证明使用这种方法后面形收敛效果很好。

## 2 投影畸变的产生

大口径非球面抛光阶段通常采用零位补偿干涉检验。零位补偿检验的原理,就是根据非球面光学元件的参数,设计并制造光学补偿器,将干涉仪产生的球面或平面波前转变为非球面波前,该波前经被检非球面表面反射后,再次通过光学补偿器还原为包含有非球面表面误差信息的球面或平面波前,与干涉仪的参考光相干涉,获得非球面表面的误差分布。

用干涉仪检测非球面时,干涉仪发出的光线经过零位补偿器,沿非球面的法线方向入射到非球面,然后再返回经过零位补偿器,最终与干涉仪发出的参考光相干涉。零位补偿器引入了一个较大的球差来补偿被检非球面反射镜的非球面偏离量。对于平面被检面,干涉仪的测量坐标与镜面坐标之间是线性关系;由于非球面表面的曲率随着镜面坐标的变化而变化,以及补偿器的设计、制造和装配中引入的误差,还有干涉仪的系统误差等的影响,致使被检非球面镜面坐标系与干涉仪的测量坐标系之间并非简单的线性关系<sup>[8]</sup>,这种坐标系之间的非线性的对应关系称作投影畸变,见图 1。而对于球面被检面,虽然也存在投影畸变问题,但干涉仪测量坐标与镜面坐标之间有确定的函数关系:

$$h' = R \cdot \sin[\arctan(h/f)]$$

其中: $h'$ 为镜面坐标高度, $R$ 为球面半径, $h$ 为干涉仪测量坐标高度, $f$ 为干涉仪标准镜焦距。所以对于球面干涉检验中的投影畸变很容易处理。对于非球面被检面,由于其本身的复杂性以及引入的零位补偿器,产生的投影畸变也很复杂,必须用特定的方法对其进行精确标定。

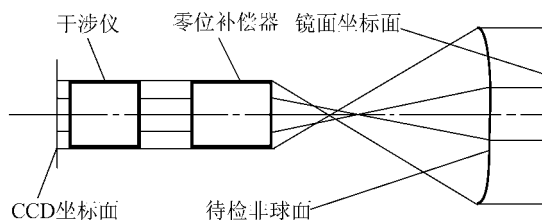


图 1 投影畸变示意图

Fig. 1 Sketch of projection distortion

光学非球面的数控加工以定量的检测结果为指导依据,因此干涉检验中的投影畸变对光学数控加工的精确性有很大的影响,而且非球面镜面越陡(相对孔径越大)受投影畸变的影响就越大,所以必须对投影畸变进行精确标定。

图 2 很直观地表明了光学非球面相对孔径对投影畸变的影响。选用口径为 1 000 mm,相对孔径分别为 1/1(曲线 1),1/2(曲线 2),1/3(曲线 3)的抛物面( $K$  为 -1)为例设计补偿器并进行光线追迹,得到各自的投影畸变曲线。根据补偿器设计结果,在补偿器入射端将入射平行光束沿半径方向作 10 等分,然后追迹这 10 条光线,得到这些光线与被检镜面的交点坐标。可以认为补偿器入射端平面波光束的坐标系与干涉仪 CCD 测量坐标成线性关系,而光线追迹获得的光线与镜面交点的  $y$  坐标的分布情况可以说明测量坐标系与镜面坐标系的关系。为了更清楚地显示出三者之间的相对关系,纵坐标采用相邻两条光线镜面  $y$  轴坐标的间隔来表示,也就是差分,横坐标是补偿器入射端沿径向等分的 10 份。可以看出,非球面的相对孔径越大,投影畸变就越严重。

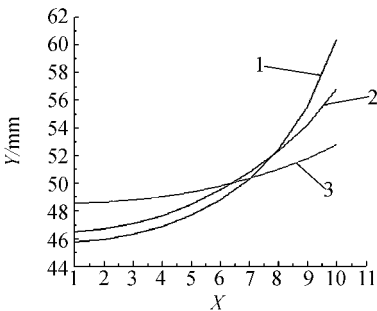


图 2 不同相对孔径的非球面元件的投影畸变

Fig. 2 Projection distortions of aspheres with different relative apertures

### 3 利用 Fiducial 方法标定投影畸变

Fiducial 是 Zygo GPI 干涉仪配套的处理软件 Metropro 中一项很重要也很实用的功能,运用它可以精确地标定出被测非球面上的点与 CCD 像素之间的对应关系。Zygo 干涉仪的 Fiducial 功能模块如图 3 所示。Fiducial 功能是用来确定干涉数据中的参考点,可帮助工件精确对准,同时,Fiducial 功能对于评价光学系统也非常有用。

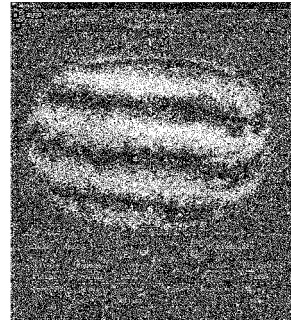


图 3 Metropro 软件中的 Fiducial 功能模块

Fig. 3 Fiducial mode of Metropro software

不过,利用 Fiducial 功能进行投影畸变的标定还没有相关报道。

首先用 Fiducial 功能在干涉图上选择想要的的数据点做出标记,因为显示器上显示的干涉图与干涉仪 CCD 上接收到的干涉图可以认为是线性对应关系,所以这些选择的数据点像素坐标系与测量坐标系可以认为是线性对应关系。Fiducial 功能可以显示这些数据点的像素位置坐标,记录下每一个数据点的像素坐标  $(x_i, y_i)$ ,同时根据干涉图样以及已经做好的 Fiducial 标记,在被测非球面上做上记号。然后把被测件返回到 CCOS 数控加工中心的轮廓测量系统中,根据被测件上预先做好的记号,确定每个点在加工系统坐标系(也就是镜面坐标系)中的坐标  $(X_{fi}, Y_{fi})$ 。根据两个坐标系获得的坐标值,进行数据拟合,得出干涉测量坐标系与 CCOS 加工坐标系的坐标关系公式及曲线,根据这个关系,对干涉结果在加工坐标系中进行面形重构,重构之后的面形结果就可用于指导 CCOS 数控加工的进行。

因为投影畸变在非球面镜面坐标系中对光轴点中心对称,且只与某点离开光轴点的距离有关,也就是说,离开光轴点的距离相同,则投影畸变的大小相同。

在 CCD 平面坐标系中,设光轴点的像素位置为  $(x_w, y_w)$ ,则各数据点到光轴点的距离为:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_w)^2 + (y_i - y_w)^2}$$

而在 CCOS 加工系统坐标系中,设光轴点的位置为  $(X_{fo}, Y_{fo})$ ,各点到光轴点的距离为:

$$R_i = \sqrt{(X_{fi} - X_{fo})^2 + (Y_{fi} - Y_{fo})^2}$$

$R$  与  $r$  之间的关系可以根据采样得到的数据点计算出的  $R_i$  和  $r_i$  来进行曲线拟合得出。根据

最小二乘原理,设某函数  $\Phi(r) = F(a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, r)$ ,使其满足:

$$\sum_{i=1}^m [\Phi(r_i) - R_i]^2 = \sum_{i=1}^m [F(a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, r_i) - R_i]^2 = \min (n < m)$$

则令  $S(a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^m [F(a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, r_i) - R_i]^2$ ,求解法方程组

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0 \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots, n),$$

得出待定系数  $a_0^*, a_1^*, a_2^*, a_3^*, \dots, a_n^*$ ,从而确定  $\Phi^*(r)$  的具体表达式。

但在实际计算中,当方程组的阶数  $n$  较大时 ( $n \geq 7$ ),方程组往往呈现病态,即当方程组的系数矩阵或右端常向量有一微小变化相应的解会变化非常大,或称为解对系数的依赖是相当灵敏的,这时求解法方程组的工作是相当不稳定的,通常可采取正交化来解决这个问题。

对函数序列  $\{\Phi_i\}, i=0, 1, 2, \dots, n$

$$\langle \Phi_j, \Phi_k \rangle = \sum_{i=1}^m \omega_i \Phi_j(x_i) \Phi_k(x_i), n < m$$

下面给出一个递推关系找出一个正交多项式<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} P_0(x) = 1, \\ P_1(x) = (x - \alpha_1)P_0(x), \\ P_{k+1}(x) = (x - \alpha_{k+1})P_k(x) - \beta_k P_{k-1}(x), \\ k = 1, 2, \dots, n-1, n < m \end{cases}$$

这里  $P_k(x)$  是首项系数为 1 的  $k$  次多项式,待定系数  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  可根据  $\{P_k(x)\}$  正交性求得:

$$\begin{cases} \alpha_{k+1} = \frac{(xP_k, P_k)}{(P_k, P_k)}, \\ \beta_k = \frac{(P_k, P_k)}{(P_{k-1}, P_{k-1})}, \\ k = 1, 2, \dots, n-1. \end{cases}$$

用归纳法可以证明这样给出的  $\{P_k(x)\}$  是正交的,用正交多项式  $\{P_k(x)\}$  的线性组合作最小二乘拟合,计算系数  $a_k^*$ ,于是得到所求的拟合曲线:

$$y^* = a_0^* P_0(x) + a_1^* P_1(x) + a_2^* P_2(x) + \dots + a_n^* P_n(x)$$

利用以上拟合方法,对投影畸变进行标定,然后干涉面形图进行重构,根据重构的面形结果指导 CCOS 数控光学加工的进行。

### 4 验证

用一块口径 400 mm × 300 mm 的非球面反

射镜( $K$  为  $-0.228\ 357$ ,顶点曲率半径  $R$  为  $2\ 681$  mm,  $A_6$  为  $2.764\ 19e^{-21}$ ,离轴量为  $283.794$  mm),对其进行了 Fiducial 标定投影畸变的工作,选取 50 个数据点用以上方法进行拟合,最终拟合精度为  $1.964\ 53\ \mu\text{m}$ ,完全达到了数控加工中心的坐标精度,拟合曲线图见图 4,(0,0)点为光轴位置;图 5 为投影畸变的差分曲线图。

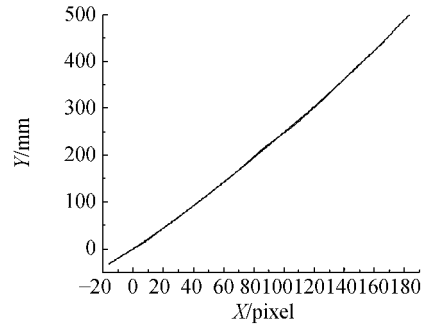


图 4 投影畸变的拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve of projection distortion

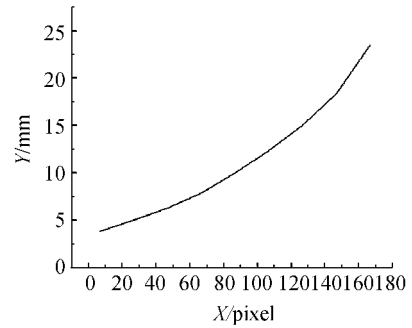


图 5 投影畸变的差分曲线图

Fig. 5 Difference curve of projection distortion

运用拟合结果对非球面镜面进行面形重构计算机模拟,面形重构软件的截屏图见图 6,右图为进行面形重构之后的截屏图。在干涉面形图上选了特征点,在加工坐标系中与面形重构后的面形图对准也很好。

用重构的面形图指导数控抛光实验,面形收敛曲线和最终的干涉条纹图见图 7 和图 8。经过 300 h 加工周期,最终面形精度优于均方根值  $0.05\lambda$ ,  $\lambda$  为  $632.8\ \text{nm}$ ,可见非球面镜面面形收敛效果也很好,说明 Fiducial 标定投影畸变的工作对数控抛光的指导作用很有效。

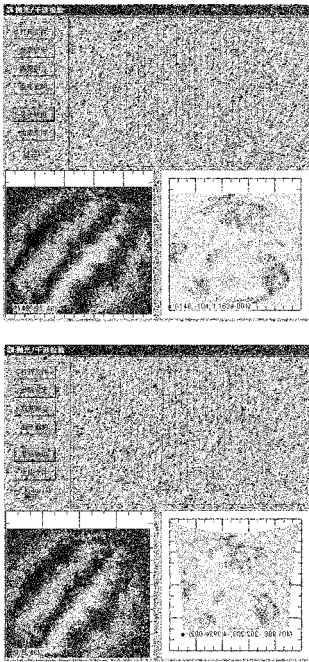


图 6 用 Fiducial 标定投影畸变并进行面形重构前后面形对比图(下为标定后重构面形图)

Fig. 6 Comparison map of the testing asphere before and after using Fiducial to calibrate projection distortion and reconstructing (right is after reconstructing)

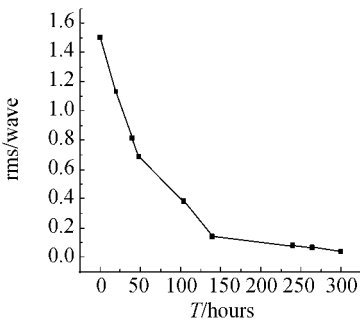


图 7 抛光实验收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of polishing

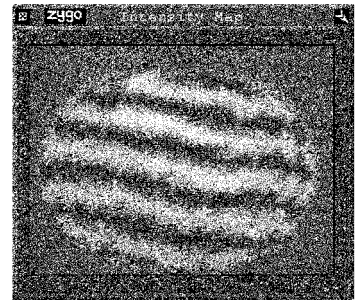


图 8 抛光实验的最终干涉条纹图

Fig. 8 Final interferogram of polishing

## 5 结 论

本文提出了一种新的简单实用的标定投影畸变的方法。利用干涉测量中的 Fiducial 功能在干涉图中选取数据点,并得出这些点像素坐标,即 CCD 测量坐标,在数控加工坐标系中找到这些数据点的加工坐标,通过数据拟合得出加工坐标系与 CCD 测量坐标系的关系,根据拟合得出的关系式进行面形重构,用重构的面形结果指导数控抛光,面形收敛效果良好,证明这种方法是切实可行的。

光线追迹法虽然在一定程度上也可以标定投影畸变,但这种方法需要对光学设计有很深的了解,对光学设计人员的依赖较大,而 Fiducial 标定投影畸变的方法更简单实用;而且光线追迹法没有考虑干涉仪的光学系统的系统误差以及补偿器的制造误差和装调误差对投影畸变的影响,而 Fiducial 方法标定投影畸变考虑了这些误差对投影畸变的影响,所以用 Fiducial 方法标定投影畸变更全面。

## 参考文献:

- [1] JONES A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with CCOS[J]. *SPIE*, 1990, 1333: 34.
- [2] JONES R A. Fabrication of a large, thin, off-axis aspheric mirror[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(12): 4067-4075.
- [3] 张学军. FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统[J]. *光学 精密工程*, 1997, 5(2): 70-76.  
ZHANG X J. FSGJ-1 system of asphere automated manufacturing and on-line testing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(2): 70-76.

- [4] 杨力. 大型非球面反射镜的柔性光学制造技术[J]. 光学技术, 2001, 27(6):490-492.  
YANG L. The flexible optical manufacturing technologies for large aspheric mirror[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6):490-492.
- [5] RUCKMAN J. Recent advances in aspheric and conformal grinding at the center for optics manufacturing[J]. *SPIE*, 1999, 3782:2-11.
- [6] RUPP W J. The development of optical surfaces during the grinding process[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(6):743-748.
- [7] MALACARA D. *Optical shop testing (Second Edition)*[M]. Wiley-Interscience, 427-454
- [8] 郑立功. 高精度、大口径离轴非球面制造技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003:67-71.  
ZHENG L G. *The research of manufacturing technologies of Off-axis asphere with big aperture and high precision*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2003:67-71.
- [9] 徐利治. 现代数学手册(计算机数学卷)[M]. 华中科技大学出版社.  
XUE L ZH. *Modern mathematics handbook (Volume of Computer Mathematics)*[M]. Huazhong University of Science and Technology Press.

作者简介: