

文章编号 1004-924X(2003)06-0612-05

# 小型非球面轮廓测量仪的原理及应用

倪 颖, 余景池, 郭培基, 聶钊

(苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**介绍了自行研制的 FLY-I 非球面轮廓仪的设计以及测量软件数学模型,其实用精度为  $1\sim 2\mu\text{m}$ 。光学元件的抛光精度取决于精磨精度,本实验室现有的 LOH 高精度铣磨机床经过对第 1 次精磨后的光学元件面形进行修正,2 次精磨后其精磨精度可达到  $2\mu\text{m}$ 。研究了这一非球面轮廓仪以配合 LOH 铣磨机床,测量得到 1 次精磨后的面形误差数据,经过误差反馈进行 2 次精磨,以保证光学元件的精磨精度。通过多次实验以及数据处理、分析,证明自行设计、装调的非球面轮廓仪达到了设计的精度要求,可满足实验室、光学加工车间对小型非球面精磨阶段面形的检测要求,即精磨面形误差在  $2\mu\text{m}$  以内,同时也可直接用于中低精度非球面光学元件的最终检测。

**关键词:**轮廓仪; 非球面加工

中图分类号:TH741.3 文献标识码:A

## Principle and application of miniature aspheric surface profilometer

NI Ying, YU Jing-chi, GUO Pei-ji, DING Ze-zhao

(Modern Optical Technology Institute, Suzhou University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** A miniature aspheric surface profilometer with a usable accuracy of  $1\sim 2\mu\text{m}$  was designed and assembled to compensate the LOH SPHEROMATIC 50SL in our lab to ensure the grinding precision of optics. Experiments and analyses proved that the miniature aspheric surface profilometer meets the testing requirements of laboratory and optical shop for surface finishing, and it is suitable for final testing of optical elements with medium and low accuracy requirements.

**Key words:** profilometer; aspheric processing

### 1 引言

在光学系统中采用非球面不但可以大幅度提高系统的性能,还能减少系统的尺寸及重量,但非球面的制造和检测这两大难题使其长期以来难以广泛应用。在非球面加工中,精磨阶段的精度和检测是影响整个非球面加工效率的关键所在。随着现代社会的发展,在军工及高科技民用产品中,对中小口径非球面的需求越来越大,而目前国内还没有可靠的用于这类非球面的检测设备,因此

研制实用的非球面轮廓测量仪就变得尤为重要。

由于在精磨阶段非球面的表面较粗糙不能进行常规的,如刀口阴影法和激光数字干涉仪等进行检测。尽管可以用  $\text{CO}_2$  红外干涉仪、三坐标测量仪、光学探头等来检测<sup>[1-3]</sup>,但是这些仪器的价格非常昂贵,且使用不便。本文介绍的光学非球面轮廓测量仪是一种自行研制的计算机控制,以光栅传感器为测头的非球面测量装置。该测量装置采用全数字式交流伺服电机控制工作台的移

动, 用光栅探头进行数据采集, 计算机软件对采集的数据进行处理和误差修正, 从而得到被测非球面面形的数字信息。

## 2 非球面轮廓测量仪的工作原理

### 2.1 非球面的表达式

轴对称非球面方程可用它的子午线截线方程表示。设光轴为  $y$  轴, 即非球面的对称轴, 坐标原点取在顶点。非球面方程为<sup>[4-5]</sup>:

$$y = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2x^2}} + A_2x^4 + A_3x^6 + \dots, \quad (1)$$

其中,  $c = \frac{1}{R_0}$ ,  $R_0$  为非球面近轴曲率半径,  $A_2, A_3, \dots$  为高次项系数  $k = -e^2$  为二次曲面偏心率的函数。式 (1) 如果只取左边第 1 项则为严格的二次曲面。

### 2.2 小型非球面轮廓测量仪的工作方式

图 1 为小型非球面轮廓仪的构造简图。伺服电机驱动工作台在  $x$  轴方向移动。

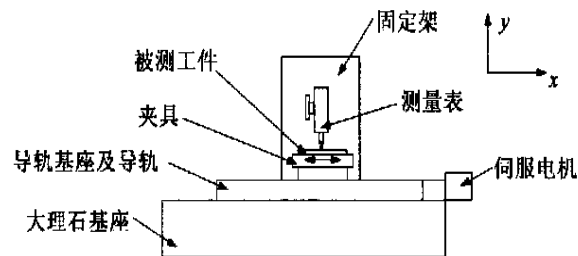


图 1 小型非球面轮廓仪的结构草图

Fig. 1 Sketch of the compact aspheric surface measuring instrument

HEIDENHAIN 测量头固定在大理石基座上, 在  $y$  方向上由测量杆升降螺母调节测量杆的高低, 以适当的位置开始测量。在输入被测工件的各个参数以及测量半径、测量步长后, 轮廓仪即可开始工作。被测工件从工件右侧所需测量半径开始向  $x$  轴正方向移动整个测量口径, 由测量头读出并由计算机记录下沿  $x$  轴方向均匀分布各点的  $x, y$  坐标值。其中测量系统对称轴位置由测量软件给出, 应与被测工件对称轴重合。

### 2.3 小型非球面轮廓仪的数学模型

图 2 为非球面测量示意图, 图中  $y$  轴的位置为装卡平台(即被测工件)的对称轴和测量系统

对称轴重合。弧线  $P$  表示被测非球面的一段母线, 圆  $Q$  为放大的测量头小球,  $Q$  是测头的球心, 坐标为  $(x_Q, y_Q)$ 。测头半径  $r$  为 1.6 mm。点  $A$  为测量头与被测面的实际接触点, 坐标为  $(x_A, y_A)$ , 角  $\alpha$  为非球面在接触点  $A$  处的切线角。角度  $\alpha$  可由非球面方程一次求导得到:

$$\alpha = \arctan \left\{ \frac{c^3(1+k)x^3}{\sqrt{1-c^2(1+k)x^2}(1+\sqrt{1-c^2(1+k)x^2})^2} + \frac{2cx}{1+\sqrt{1-c^2(1+k)x^2}} + 4A_2x^3 + 6A_3x^5 + \dots \right\}, \quad (2)$$

测头球心点  $Q$  的坐标  $(x, y)$  可分别由移动台和测

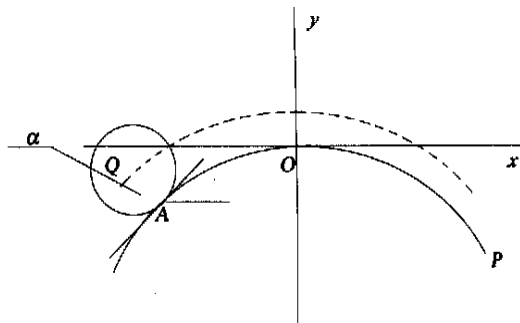


图 2 非球面光学元件测量示意图

量头读出。假设接触点  $A$  沿  $x$  轴方向均匀分布, 设某一点  $i$  的理论坐标为  $(x_{Ai}, y_{Ai})$ , 而点  $i$  的实际矢高值为  $y'_{Ai}$ , 此时实际的切线角为  $\alpha_i$ 。从图 2 可得出当接触点为  $i$  时, 测量头球心坐标值为:

$$\begin{cases} x_{Qi} = x_{Ai} - r \times \sin \alpha_i \\ y_{Qi} = y_{Ai} + r \times \cos \alpha_i \end{cases}, \quad (3)$$

上式为被测非球面的理论值。在测量时, 工作台移动量即根据式 3 结果得到测量头读数  $y_i$ , 在此条件下测头球心坐标的读数和被测非球面点  $i$  实际坐标值的关系可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = x_{Qi} = x_{Ai} - r \times \sin \alpha_i \\ y_i = y'_{Ai} + r \times \cos \alpha_i, \end{cases} \quad (4)$$

上式即为被测非球面的实际测量值。这样实际上得到的是测量头球心相对于被测非球面镜头子午截线的包络线。对应每一点, 被测非球面的面形误差为  $y_i - y_{Qi}$ , 由此可得出整个非球面面形的误差曲线。

## 3 小型非球面轮廓仪精度的标定

### 3.1 利用 zygo 干涉仪对轮廓仪进行精度标定

一般可以采用干涉仪对光学元件进行检测,但由于干涉仪的价格高昂、调整复杂,而且检测非球面都需要使用补偿器,因此对于低、中精度的光学元件来说,采用干涉仪进行最终检测成本较高。而研制的小型非球面轮廓仪的成本较低、检测操作方便,适用于中小型实验室和光学加工车间用于中、低精度光学元件的检测。

图3显示了非球面轮廓测量仪检测的一个非球面镜片顶点附近的面形误差曲线。曲线的横坐标表示测量的范围,单位 mm,纵坐标表示被测子午截线的误差值,单位为波长,规定顶点误差为 0。

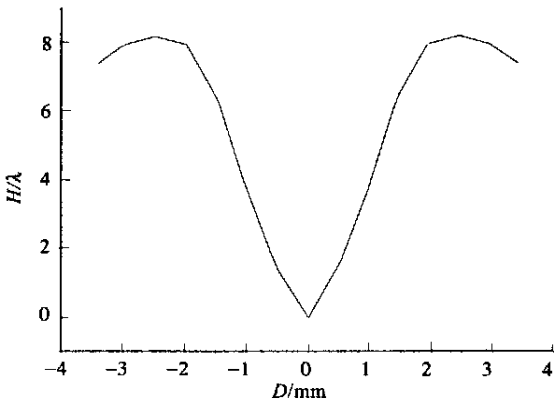
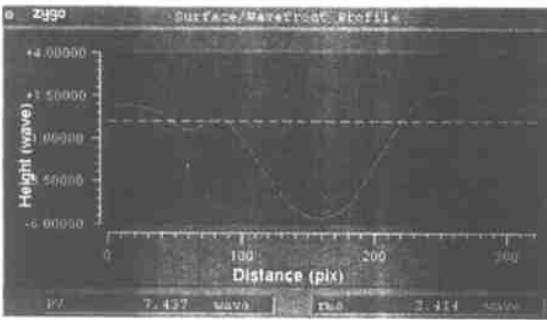


图 3 轮廓仪测得的非球面面形误差曲线

Fig.3 Error plot of polished lens measured by the instrument



4 由 zygo 数字干涉仪测得的同一非球面面形误差曲线

Fig. 4 Error plot of polished lens measured by zygo

图 4 为同一工件在 zygo 数字干涉仪上检测的结果,由于没有补偿器,zygo 干涉仪只能检测到非球面顶点周围的面形情况,检测范围和非球面轮廓仪的检测范围相同,在干涉仪成像图上显示为 320 个像素左右。图 4 显示了被测工件检测范围内一段子午截线的误差值,曲线的横坐标表示测量的范围,用

像素来表示,纵坐标表示剖面面形高度,单位为  $\lambda$  zygo 干涉仪的测量  $\lambda$  为 632.8 nm。

在图 3 中可看到被测非球面在顶点处是凹陷的,由顶点向外慢慢升高,在半径 3 mm 左右处达到最高值,与顶点最低处的差值约为 8 个  $\lambda$  由此向外,面形继续降低。被测非球面的干涉仪成像图在顶点最低处为 -6 个  $\lambda$  左右,在中央 180 像素范围处达到最高值 1.7  $\lambda$ ,最高处和最低处相差大约为 7.7  $\lambda$ 。对照图 3 和图 4,可以观察得到自行研制的小型非球面轮廓仪检测到的面形情况和 zygo 干涉仪所检测到的面形情况是基本一致的。由此可知,使用本轮廓仪检测的非球面面形是准确的,测量精度 1~2  $\mu\text{m}$  达到了设计要求。

### 3.2 利用标准样板球面对非球面轮廓仪精度标定

图5为测量一个口径70mm,曲率半径为

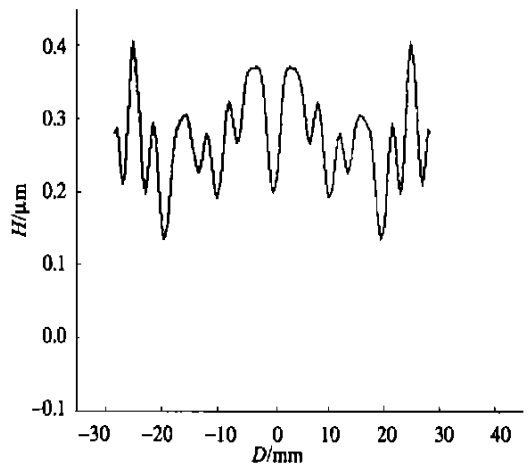


图 5 轮廓仪测得标准样板球面面形误差曲线

Fig.5 Error of a standard sphere measured by the instrument

134.61 mm 的 A 级球面样板得到的误差曲线。A 级样板的轮廓误差极小,相对于小型非球面轮廓测量仪来说可以看作是一个标准面,输入测量软件的曲率半径为实际测量值。图 5 中可看到由轮廓仪测量的标准样板球面的误差值在 0.5  $\mu\text{m}$  以内,由此也可得知自行研制的非球面轮廓仪的测量精度是可信的,达到了设计所要求的 1~2  $\mu\text{m}$  的精度。

## 4 轮廓仪的实际应用及实验结果分析

### 4.1 轮廓仪用于检测、反馈精磨误差的实验

自行研制的这台小型非球面轮廓测量仪的目的

就是检测已知方程的各种非球面, 形成非球面精度铣磨机床的反馈修正数据, 指导非球面精密铣磨机的进一步铣磨加工, 以提高铣磨加工机床的精度, 也可以完成一些低精度非球面光学元件的测量。

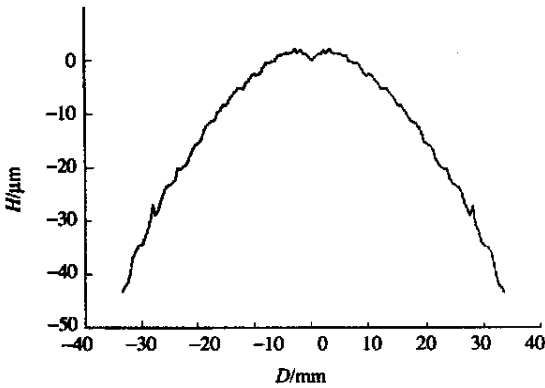


图 6 第 1 次铣磨后的非球面面形误差曲线

Fig. 6 Error plot of aspheric surface after the first grinding

图 6 为测量得到的 LOH 机床铣磨的口径为 68 mm、顶点曲率半径  $R = 72.65$  mm 的凹非球面镜片未经补偿时的轮廓误差曲线, 由图 6 可看到最大误差达到了  $43.5 \mu\text{m}$ , 显然这样的铣磨误差是无法保证非球面加工精度的。而这样的误差并非由机床精度不足造成的, 而是由于磨头参数输入时的不确定性所致。对其误差值进行曲线拟合, 再由拟合得到的多项式方程计算出各加工离散点相对于理论方程的差值, 得到了 LOH 机床铣磨的反馈修正数据, 输入到 LOH 机床中, 指导 LOH 机床进一步铣磨。图 7 显示了同一工件在经过反馈修正, 第 2 次铣磨后的误差曲线, 可看到其面形误差曲线在  $2 \mu\text{m}$  范围内, 基本达到了铣磨对面形精度的要求。

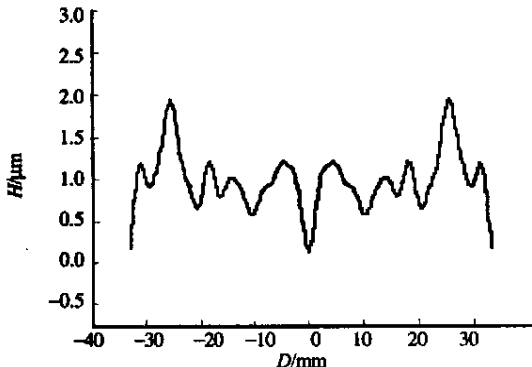


图 7 经反馈第 2 次铣磨后的非球面面形误差曲线

Fig. 7 Error plot of aspheric surface after the second grinding

#### 4.2 用轮廓仪检测未知方程的非球面

小型非球面轮廓仪可用于未知方程非球面的检测, 得到被测非球面的方程。所有的非球面均可看成是在球面基底上加一层不等厚的材料而形成的, 故总是可以表示为如下形式:

$$y = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - c^2x^2}} + A_2x^4 + A_3x^6 + \dots, \quad (5)$$

式中第 1 项即为球面, 后面项为不等厚层的表达式。被测非球面的基底球曲率半径可由球径仪测量非球面近顶点区域而得到。

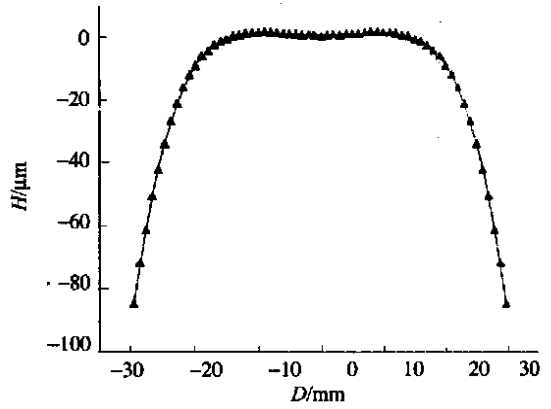


图 8 测量未知方程非球面面形误差曲线

Fig. 8 Error plot of lens with unknown function

在轮廓仪测量软件中输入被测非球面的顶点曲率半径, 其他参数均设为 0。此时被测表面被虚拟为球面, 即:

$$y = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - c^2x^2}}, \quad (6)$$

比较式 (5) 和式 (6) 可知实际测量值减去理论值, 即通常意义上球面的误差在不考虑测量误差的情况下, 实际上就是非球面不等厚层的数据, 即为

$$\Delta y = A_1 + A_2x^4 + A_3x^6 + \dots, \quad (7)$$

被测非球面的各高次项系数  $A_2, A_3, \dots$  可由测得的被测工件面形上各离散点的误差值进行多项式拟合来得到。

图 8 为测量一个未知非球面得到的面形误差曲线, 其顶点曲率半径由球径仪测量得到为 110.2 mm。图中横坐标为测量范围, 单位 mm; 纵坐标表示各点误差值, 单位为  $\mu\text{m}$ ; 三角形的点表示各测量点的离散误差值, 直线为经过多项式拟合后的误差曲线。

该镜片的误差曲线按式(7):  $\Delta y = A_1 + A_2x^4 + A_3x^6 + A_4x^8 + \dots$  来进行多项式拟合。其中  $A_1$  为常数项, 对被测镜片的面形没有影响,

可在数据处理时去除。经过实验, 发现最高次拟合到  $x$  的 10 次方比较合适。表 1 给出了几个未知方程的非球面镜片的多项式拟合结果。

表 1 几个未知方程非球面镜片的多次项拟合系数  
Tab. 1 Polynomial fitting parameters of aspherical lenses

半径(mm)	4 <sup>th</sup> 系数 $A_2$	6 <sup>th</sup> 系数 $A_3$	8 <sup>th</sup> 系数 $A_4$	10 <sup>th</sup> 系数 $A_5$
110.2	4.00E-08	-3.6801E-10	2.8233E-13	-6.8329E-17
188.9	-1.2E-7	5.5129E-10	-3.324E-13	5.36E-17
410.19	8.00E-08	3.29E-11	-8.32E-15	-8.29E-18

图 9 即为图 8 中被测非球面镜片与虚拟顶点球面差值拟合出高次项系数后, 构造出的非球面与实际

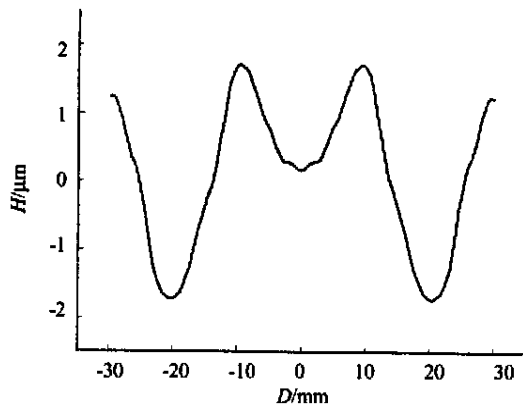


图 9 拟合得到方程参数后测得的面形误差曲线  
Fig. 9 Error plot of the lens with the parameter

际测量值的偏离曲线, 从图 9 中可以看出误差在 3.5  $\mu\text{m}$  以内, 这是由于被侧面本身的误差及测量和数据处理时引入误差的综合结果, 是在可接受的范围内。可见利用小型非球面轮廓仪对一些未知参数的非球面进行测量, 反算其参数, 即可得到被测非球面的方程, 指导实验室的进一步设计和加工。

## 5 结 论

综上所述, 自行研制的小型非球面轮廓仪精度为 1~2  $\mu\text{m}$ , 达到了设计要求, 满足了实验室, 光学加工车间对小型非球面光学元件的检测要求。

## 参考文献:

- [1] 蒋剑峰, 何永辉, 赵万生. 表面三维微观形貌检测技术及其发展[J]. 中国机械工程, 1999, 10(12): 1418-1420.  
JIANG J F, HE Y H, ZHAO W SH. Surface 3D micro topography measurement technology and its development[J]. *China Mechanical Engineering*, 1999, 10(12): 1418-1420. (in Chinese)
- [2] 王富生, 谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 309-315.  
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 309-315. (in Chinese)
- [3] 张学军, 张云峰, 余景池, 等. FSGJ1 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, ZHANG Y F, YU J CH, et al. FSGJ1 aspheres automatic fabrication and on line testing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(2): 70-76. (in Chinese)
- [4] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 326-327.  
YANG L. *Advanced optical manufacturing technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 326-327. (in Chinese)
- [5] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982, 169-171.  
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 1982. 169-171. (in Chinese)

作者简介: 倪颖(1977-), 女, 江苏苏州人, 苏州大学现代光学技术研究所硕士研究生, 研究方向为数控非球面加工与检测。电话: 0512 65113415(O) 0512 65219299(H); E-mail: nyjanet@etang.com