

文章编号 1004-924X(2008)09-1577-05

基于 PZT 的非球面能动抛光盘定位误差分析

胡自强^{1,2,4}, 凌 宁¹, 潘君骅³, 饶长辉¹, 姜文汉¹

(1. 中国科学院 成都光电所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;
3. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006; 4. 烟台大学 光电信息学院, 山东 烟台 264001)

摘要:研制了一个口径为 100 mm、含 19 个 PZT 驱动器的非球面能动抛光磨盘,用于加工口径为 350 mm、 $k = -1.112\ 155$ 、顶点半径为 840 mm 的双曲面镜。为研究定位误差对非球面能动抛光磨盘输出面形精度的影响,对磨盘上任意点所需变形量 δ 以及由定位误差引入的变形量误差 $\Delta\delta$ 进行了理论公式推导,并利用有限元分析方法计算得到了当非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离 L 为 120 mm 且 δL 分别为 0, -1.0, -0.5, 0.5, 1 mm 时,非球面能动抛光磨盘输出面形与理论面形比较剩余残差 RMS 相应分别为 0.329, 0.454, 0.366, 0.367, 0.461 μm ,定位误差导致剩余残差 RMS 分别相应增加 0.38%, 10.9%, 11.2%, 40%。因此,定位误差应该控制在 ± 0.5 mm 以内。

关键词:非球面镜;非球面能动抛光磨盘;定位误差分析;PZT 驱动器

中图分类号:TQ171.68 **文献标识码:**A

Location error analysis of deformable aspheric polishing lap based on PZT actuator

HU Zi-qiang^{1,2,4}, LING Ning¹, PAN Jun-hua³, RAO Chang-hui¹, JIANG Wen-han¹

(1. *Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Modern Optical Technology Institute, Suzhou University, Suzhou 215006, China;*
4. *School of Optics & Electronics Information, Yantai University, Yantai 264001, China*)

Abstract: A $\phi 100$ mm deformable polishing lap consisting of 19 PZT actuators was designed and manufactured to polish a hyperboloid mirror with $\Phi = 350$ mm, $k = -1.112\ 155$, and $R = 840$ mm. In order to analyze the influence of location error on surface error, the formulas were deduced to calculate the deformation and deformation errors of any points on the lap surface. The surface errors were calculated by finite element method, calculated results show that when the distance from deformable polishing lap to the hyperboloid mirror center L is 120 mm and location error δL is 0, 1.0, -0.5, 0.5, 1.0 mm, the surface error RMS are 0.329, 0.454, 0.366, 0.367, 0.461 μm , which increases by 0.38%, 10.9%, 11.2%, 40% respectively. These data given here suggest that the location errors should be controlled less than ± 0.5 mm.

Key words: aspherical mirror; deformable aspheric polishing lap; location error analysis; PZT actuator

收稿日期:2007-11-13;修订日期:2008-03-14.

基金项目:中国科学院创新基金资助项目;山东省重点实验室资助项目;烟台大学青年基金资助项目

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质量,但长期以来非球面的制造和检测这两大难题限制了它的广泛应用。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^[1]。

以小磨盘修改局部误差为基础的计算机控制抛光技术是非球面制造技术的一次飞跃。与过去的人工修磨相比,其优点在于失误率小,收敛快;缺点在于留下小的局部误差,即高频误差较大。为此,对于大的天文镜面制造,人们发展了一种计算机控制的可变形抛光盘技术,即用适当大一些的抛光盘,在抛光运动过程中随时自动改变抛光盘的形状以适应所到之处的镜面面形。实验证明,它与小磨盘技术结合,可以加工出很好的镜面。但这种可变形抛光盘只适用于大镜面,因为使抛光盘变形的执行机构都要放置在抛光盘的背面,没有足够的空间就无法实现^[2]。

基于 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光磨盘,为中小口径非球面镜提供了一种新的工具。其基本原理是:当被加工非球面工件以旋转轴为中心旋转时,能动抛光磨盘在工件表面沿径向相对工件进行移动;根据能动抛光磨盘与被加工非球面工件的相对位置,控制 PZT 压电陶瓷驱动器变形,按规定改变能动抛光磨盘的面形,从而使能动抛光磨盘能够在任意时刻和位置产生理想非球面镜的局部表面形状,将工件加工为非球面。

本文研制了一个口径为 100 mm、19 单元 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光磨盘,用于一个口径为 350 mm、 $k = -1.112\ 155$ 、顶点半径为 840 mm 的双曲面镜实验加工。每个 PZT 压电陶瓷驱动器的驱动行程为 60 μm ,大于双曲面镜的最大非球面量 $\Delta = 54.8\ \mu\text{m}$ 。

影响非球面能动抛光磨盘输出面形精度的主要因素有:PZT 压电陶瓷驱动器的非线性;非球面能动抛光磨盘在相对非球面工件移动时的定位误差;测量误差等。其中对 PZT 压电陶瓷驱动器所固有的迟滞、蠕变特性带来的迟滞非线性误差^[3],采用 BP 神经网络建模,实现非线性补偿优化控制。PZT 压电陶瓷驱动器的非线性和测量

误差的影响在此不做深入讨论,另行详述。

为研究定位误差对非球面能动抛光磨盘输出面形精度的影响,对磨盘上任意点所需变形量 δ 以及由定位误差引入的变形量误差 $\Delta\delta$ 进行了理论公式推导,并利用有限元分析方法^[4]计算定位误差对非球面能动抛光磨盘输出面形精度的影响。根据计算结果,得到了定位误差所必须控制的范围,为提高加工精度提供指导。

2 能动磨盘变形量理论计算

以加工口径为 350 mm、 $k = -1.112\ 155$ 、顶点半径为 840 mm 的双曲面非球面镜为例,当坐

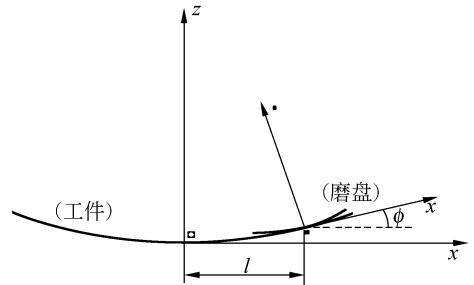


图 1 坐标系变换示意图

Fig. 1 Transformation of coordinates

标系原点由工件中心变为磨盘中心后,如图 1 所示,磨盘上任意点需变形量 $\delta(x, y)$ 的计算公式为:

$$\phi = \arcsin \frac{l}{r}, c = \cos \phi, s = \sin \phi,$$

$$z_{\text{sph}} = r - \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)},$$

$$z_{\text{asph}} = \frac{1}{2(-c^2 - c^2 k - s^2)}(m + \sqrt{\omega}),$$

$$m = 2cr + 2ckr - 2ct - 2ckt - 2cR - 2ls + 2cksx + 2c\Delta + 2ck\Delta,$$

$$\omega = (-m)^2 - 4(-c^2 - ck^2 - s^2)(kl^2 - 2r^2 - 2kr^2 + 2rt + 2krt + 2rR - 2tR - 2clx - 2rsx - 2krsx + 2tsx + 2ktsx + 2Rsx - c^2x^2 - s^2x^2 - ks^2x^2 - y^2 - 2r\Delta - 2kr\Delta + 2t\Delta + 2kt\Delta + 2R\Delta - 2sx\Delta - 2ksx\Delta - \Delta^2 - \Delta^2k),$$

$$t = \sqrt{-l^2 + r^2},$$

$$\delta(x, y) = z_{\text{sph}} - z_{\text{asph}}, \quad (1)$$

其中: Δ 为最接近球面和双曲面之间的最大非球面量, r 变形磨盘的初始半径, R 工件双曲面的顶

点半径。

根据此公式,可以计算出在加工过程中,当非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离为 L 时,磨盘上任意点需要的变形量。

3 X 方向定位误差理论计算

加工过程中,非球面能动抛光磨盘在非球面工件上沿 X 方向做往复运动,若非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离存在误差,即:

$$l' = l + \delta l,$$

则磨盘上任意点需要的变形量,由此引入的变形误差 $\Delta\delta$ 的计算公式如下:

$$\phi' = \arcsin \frac{l'}{r}, c' = \cos \phi',$$

$$s' = \sin \phi', t' = \sqrt{-l'^2 + r^2},$$

$$m' = 2c'r + 2c'kr - 2c't' - 2c'kt' - 2c'R - 2l's + 2c'ks'x + 2c'\Delta + 2c'k\Delta,$$

$$\begin{aligned} w' = & (-m')^2 - 4(-c'^2 - c'k^2 - s'^2)(kl'^2 - 2r^2 - \\ & 2kr^2 + 2rt' + 2krt' + 2rR - 2t'R - 2c'l'x - 2rs'x - \\ & 2krs'x + 2t's'x + 2kt's'x + 2Rs'x - c'^2x^2 - s'^2x^2 - \\ & ks'^2x^2 - y^2 - 2r\Delta - 2kr\Delta + 2t'\Delta + 2kt'\Delta + 2R\Delta - \\ & 2s'x\Delta - 2ks'x\Delta - \Delta^2 - \Delta^2k), \end{aligned}$$

$$z'_{\text{asph}} = \frac{1}{2(-c'^2 - c'k^2 - s'^2)}(m' + \sqrt{w'}),$$

$$\delta'(x, y) = z_{\text{sph}} - z'_{\text{asph}},$$

$$\Delta\delta = \delta' - \delta = z_{\text{asp}} - z'_{\text{asp}}. \quad (2)$$

Y 方向上的定位误差计算原理与 X 方向相同,在此不作讨论。

4 有限元分析计算

根据能动光学器件的工作原理,磨盘表面整体变形为所有驱动器对盘面单独作用的线性组合^[5]。

能动变形反射镜的影响函数可以近似看作一个高斯形状的函数,设为:

$$f(r) = \exp[-(|\mathbf{r}|/\omega_0)^\alpha], \quad (3)$$

式中, α 为高斯指数, ω_0 为特征宽度, \mathbf{r} 为采样点距驱动器作用点的距离。 ω_0 和 α 的大小受驱动器间距、磨盘面刚度等因素的影响。

磨盘面要产生的表面变形可以表示为:

$$\begin{aligned} S(\mathbf{r}_i) = & \sum_{j=1}^N [f(\mathbf{r}, \mathbf{R}_j) \cdot C_j] = \\ & \sum_{j=1}^N \left\{ \exp\left[-\left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_j|}{\omega_0}\right)^\alpha\right] \cdot C_j \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, M 磨盘面上采样点的数量, N 为驱动器的数量, \mathbf{r}_i 为磨盘面上第 i 个采样点的坐标, \mathbf{R}_j 为第 j 个驱动器的中心坐标, C_j 为第 j 个驱动器的驱动信号。以矩阵形式可以表示为:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{A}_{ij} \times \mathbf{C}_j \quad (i \leq M, j \leq N)$$

在计算中 A_{ij} 为影响函数,意义为第 j 个驱动器产生单位变形时对第 i 个点的影响,通过求解矩阵的广义逆可求得每个驱动器需要的驱动幅度:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_j = & [\mathbf{A}_{ij}]^{-1} \times \mathbf{S}_j = [\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n]^T; \\ & (i \leq M, j \leq N) \end{aligned} \quad (5)$$

此处采用 ALGOR 有限元计算软件包,建立 19 单元 PZT 压电陶瓷驱动器非球面能动抛光磨盘的有限元计算模型如图 2。

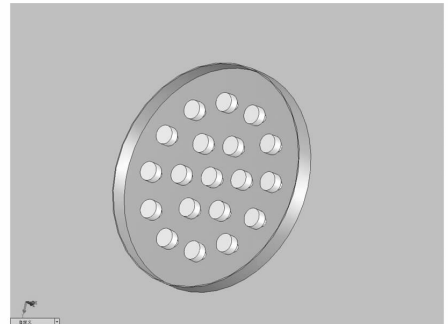


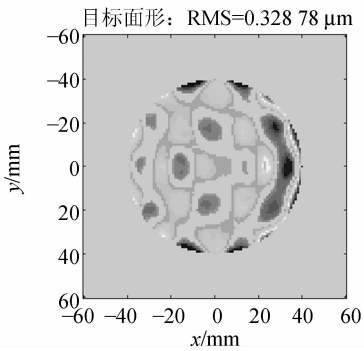
图2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model of lap

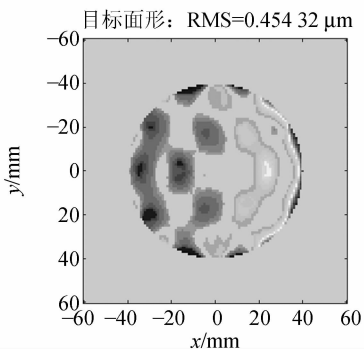
由有限元法计算出所有各 PZT 压电陶瓷驱动器的影响函数,结合磨盘需要形成的表面形状,可计算各 PZT 压电陶瓷驱动器上产生的位移幅值大小和最终产生的表面形状,同双曲面的理论面形相比较就得到剩余残差的形状和用均方根值 RMS 表示的误差大小。

当非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离为 120 mm, δL 分别为 0, -1.0, -0.5, 0.5, 1.0 mm 时,计算 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光磨盘输出面形,与双曲面理论面形相比较得到的剩余残差, RMS 相应分别为

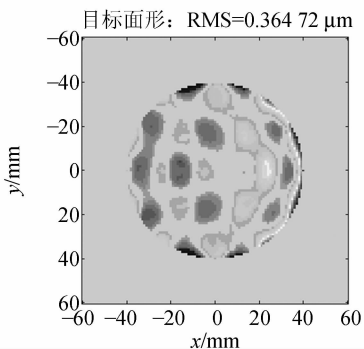
0.329 μm , 0.454 μm , 0.366 μm , 0.367 μm ,
0.461 μm 。结果如图 3 所示。



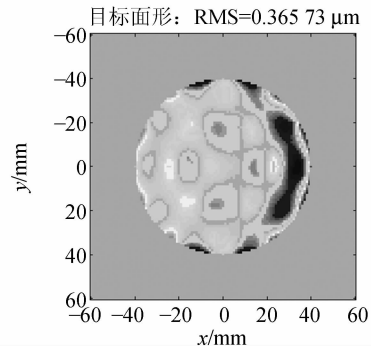
(a) $\delta L=0$, $\text{RMS}=0.329 \mu\text{m}$



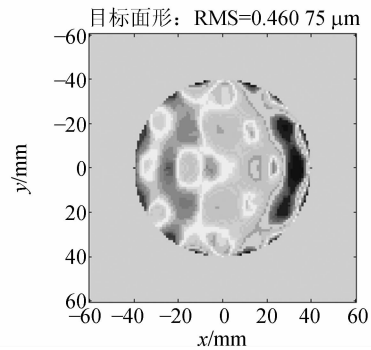
(b) $\delta L=-1 \text{ mm}$, $\text{RMS}=0.454 \mu\text{m}$



(c) $\delta L=-0.5 \text{ mm}$, $\text{RMS}=0.365 \mu\text{m}$



(d) $\delta L=0.5 \text{ mm}$, $\text{RMS}=0.366 \mu\text{m}$



(e) $\delta L=1 \text{ mm}$, $\text{RMS}=0.461 \mu\text{m}$

图 3 定位误差 δL 分别为 0, -1.0, -0.5, 0.5, 1.0 mm 时, 剩余残差的计算结果

Fig. 3 Calculation results of residual error, when δL is 0, -1.0, -0.5, 0.5, 1.0 mm, respectively

5 结 论

根据计算结果, 得出以下结论:

在 X 方向定位误差对的影响下, 当非球面能动抛光磨盘中心到非球面工件中心的距离为 120 mm, 且 δL 分别为 -1.0, -0.5, 0.5, 1.0 mm 时, 非球面能动抛光磨盘输出面形的误差 RMS 分别增加 38%, 10.9%, 11.2%, 40%。

为提高保证加工精度, X 方向上的定位误差应该控制在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 以内。

参考文献:

- [1] 倪颖, 余景池, 郭培基, 等. 小型非球面轮廓测量仪的原理及应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 612-616. NI Y, YU J CH, GUO P J, et al.. Principle and application of miniature aspheric surface profile meter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 612-616. (in Chinese)
- [2] 潘君骅. 成像光学工程面临的光学问题[J]. 中国工程科学, 2000, 2(3): 32-35. PAN J H. Optical problems in imaging optical engineering[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(3): 32-35. (in Chi-

nese)

- [3] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1032-1040. (in Chinese)
- [4] 张布卿,马建设,潘龙法,等. 用有限元和灵敏度分析法改善光学头力矩器高频动态特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1002-1008.
ZHANG B Q, MA J SH, PAN L F, *et al.*. Improvement of high frequency dynamic performance of actuator in optical pickup by finite element and sensitivity methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1002-1008. (in Chinese)
- [5] 曾志革,邓建明,李晓今,等. 能动抛光磨盘的变形实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 555-559.
ZENG ZH G, DENG J M, LI X J, *et al.*. Investigation of deformation experiment for active polishing lap[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 555-559. (in Chinese)

作者简介:胡自强(1974—),男,博士研究生,主要从事非球面加工和能动抛光盘等方面的研究。E-mail: hzqls@126.com

导师简介:凌 宁(1935—),女,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: ningling@ioe.ac.cn

●下期预告

一种新的三焦点 DVD 光学头单片物镜设计

黄文浩,雷双艳,胡衍雷,孟祥儒

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

为了兼容 CD、DVD、HD-DVD 3 种盘片,设计了适用于 780、650 和 405 nm 3 个波长的二元衍射面和非球面相结合的单片物镜,3 个波长对应的物镜数值孔径分别为 0.45、0.60 和 0.65。首先,介绍单物镜实现三焦点原理;接着,详细论述了二元衍射面和非球面的设计理论、结构参数,即二元衍射面刻环区域被分割成 2 个同心环形区域,根据谐衍射原理,每个区域对不同的波长设定不同的衍射级次;最后,根据光学头物镜的性能评价参数,应用 zemax 软件进行理论模拟和公差分析。结果表明,所设计的物镜波像、波前均方差分别 $< 0.07 \lambda$ 、 0.035λ ,空间截止频率 $> 1\ 200$ cycle/mm,曲率半径和厚度公差为 300 nm,能达到实际应用的技术要求。