

# 矩形离轴非球面反射镜的数控加工

郑立功<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>, 张 峰<sup>2</sup>

- (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 130033;  
2. 吉林大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对离轴 TMA 结构空间相机中使用的两块离轴非球面反射镜的加工过程, 提出了一种新型的矩形离轴非球面的最接近球面半径的求解及其优化方法, 并且开发了基于计算机虚拟加工技术的 CCOS 工艺参数计算方法。被加工工件分别为 165 mm × 100 mm 的矩形凸面离轴非球面和 770 mm × 200 mm 的矩形轻量化凹面离轴非球面, 设计精度分别为任意 100 mm, 200 mm 子孔径面形精度优于 0.025 RMS ( $\lambda = 632.8$  nm)。经检验, 工件的加工精度满足了设计要求, 分别达到了 0.023 RMS 和 0.013 RMS。

**关键词:** 非球面加工; 离轴非球面; 计算机控制光学表面; 虚拟加工

**中图分类号:** TQ171.684 **文献标识码:** A

## NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors

ZHENGLi-gong<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>

- (1. *Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)  
2. *Jilin University, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** A new way of solving and optimizing a best-fit sphere is proposed for surfacing and testing of two off-axis mirrors. A virtual fabrication program was developed for determination of CCOS CNC process parameters. The two off-axis aspheric mirrors surfaced are a convex mirror with an aperture of 165 mm × 100 mm and a lightweighted concave mirror with an aperture of 770 mm × 200 mm, and the design accuracies required for these two off-axis mirrors are better than 0.025 RMS with  $\lambda = 632.8$  nm over any 100 nm or 200 nm diameter sub-aperture. Inspections showed that the finish accuracies of convex and concave mirrors satisfied the design requirements, and they reached 0.023 RMS and 0.013 RMS respectively.

**Key words:** aspheric processing; off-axis asphere; computer controlled optical surfacing; virtual manufacturing

## 1 引言

20 世纪 90 年代提出的离轴三反消像散 (TMA) 型结构是同时实现对地观测光学遥感器大视场、高分辨率和较小的质量、体积的一种有效

手段<sup>[1-2]</sup>。这种结构在光学系统设计上要求使用 3 块离轴非球面反射镜, 而离轴非球面的制造技术是 TMA 结构相机的技术难点之一。主要原因是非球面元件在不同的几何坐标位置上曲率半径不同, 因此既不能使用传统的范成法加工, 也不能直接使用干涉仪获得检验结果。离轴非球面是回

收稿日期: 2003-06-20; 修订日期: 2003-11-14.

基金项目: 国家杰出青年基金 (No. 69925512)

转对称的非球面母镜的一部分，但其光轴不通过镜面的几何中心，甚至在镜面范围以外，因此离轴非球面不具备旋转对称的性质。与共轴非球面相比，离轴非球面的这种不对称性给加工、检验增加了难度。

随着先进制造技术和计算机、数控等技术的发展，近年来非球面的加工技术也有了长足的进步。对于中小尺寸的共轴非球面光学元件，采用高精度的确定性铣磨技术，辅以磁流变抛光，可以达到很高的精度水平<sup>[3]</sup>。但这项技术目前只能用于回转对称曲面的加工，不能适用于对大口径非球面的制造，特别是离轴非球面的制造。目前离轴非球面的制造仍主要采取子孔径研抛的方法，比较常用的技术主要包括 CCOS (Computer Controlled Optical Surfacing, 计算机控制光学表面成形) 制造技术，应力盘抛光技术<sup>[4]</sup>等等。其中 CCOS 技术工艺比较成熟，可以实现较低成本、高精度非球面制造，并适用于离轴非球面的加工。

文中针对 165 mm ×100 mm 矩形凸面离轴非球面和 770 mm ×200 mm 矩形轻量化凹面离轴非球面反射镜的加工过程，对 CCOS 法加工离轴非球面的主要技术进行讨论。

## 2 非球面的主要技术指标

对于以  $z$  为轴的旋转曲面形成的非球面光学表面，通常采用下面的方程<sup>[5]</sup>来描述：

$$z = f_{\text{sphere}} = \frac{cs^2}{1 + [1 - (k + 1)c^2s^2]^{1/2}} + A_1s^2 + A_2s^4 + A_3s^6 + A_4s^8 + \dots, \quad (1)$$

式中： $s^2 = x^2 + y^2$ ； $c = 1/r$ ， $r$  为顶点曲率半径； $k$  为 2 次项系数， $A_1, A_2, A_3, A_4$  为高次非球面偏离系数。

被加工的凸面离轴非球面反射镜均为 2 次曲面，其有效通光口径为 165 mm ×100 mm，顶点曲率半径为 900 mm，2 次项系数  $k$  等于 -4.2，离轴量为 100 mm，使用精选熔石英材料，面形精度要求任意 100 mm 子口径优于  $\lambda/40$  RMS；凹面镜为高次离轴非球面，其有效通光口径为 770 mm ×200 mm，顶点曲率半径  $r$  为 1 990 mm，2 次项系数  $k$  等于 0.15，高次项系数  $A_2$  为  $3.6 \times 10^{-19}$ ，离轴量为 170 mm，使用微晶玻璃材料，面形精度要求任意 200 mm 子口径优于  $\lambda/40$  RMS。

## 3 最接近球面的确定

最接近球面，是指按照与非球面相比加工余量最小的原则，通过计算获得的球面。CCOS 技术加工非球面，一般从最接近球面开始。对于同轴非球面，工程上一般采用 3 点法确定<sup>[6]</sup>，也就是以同时通过非球面顶点和有效口径边缘两点的球面作为非球面的最接近球面。由于离轴非球面的镜面几何坐标不同于其同轴非球面母镜的坐标，用这种方法确定最接近球面，加工余量较大。为解决这个问题，使用三维优化的办法计算离轴非球面最接近球面半径和顶点位置。

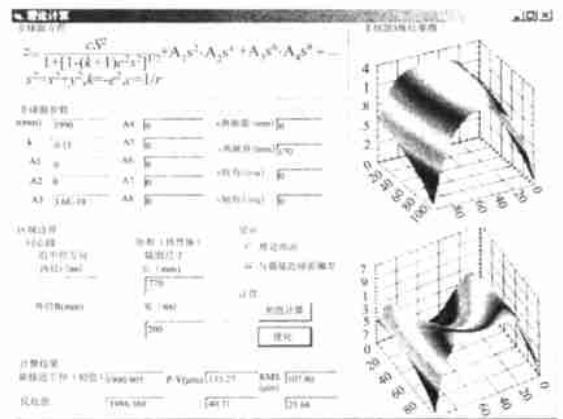


图 1 ASM 软件计算最接近球面  
Fig. 1 Calculating of best-fit sphere by ASM

由非球面方程 (1)，经推导，可以得出：

$$f_{\text{sphere}}(x, y) = (-1)^i \sqrt{\left(\frac{r}{k+1}\right)^2 - \left(\frac{s^2}{k+1}\right)} + \frac{r}{k+1} + A_1s^4 + A_2s^6 + \dots, \quad (2)$$

其中， $r$  为顶点曲率半径， $k$  为二次项系数， $s^2 = x^2 + y^2$ ；当  $i = 1, r > 0$  时表示凹面； $i = 2, r < 0$  表示凸面。

设最接近球面方程为 ( $i = 1$  凹面， $i = 2$  凸面， $R$  为球面半径， $y_0, z_0$  分别为球面在  $y, z$  方向的偏离量)：

$$f_{\text{sphere}}(x, y) = (-1)^i \sqrt{R^2 - x^2 - (y - y_0)^2} + z_0, \quad (3)$$

则对于非球面上任一点  $p(x, y)$ ，最接近球面与非球面的偏离量为：

$$\Delta(x, y) = f_{\text{sphere}}(x, y) - f_{\text{asphere}}(x, y), \quad (4)$$

对最接近球面方程的求解，实质上是约束极值的求解问题。

$$\begin{cases} f(R, \theta, \phi) = \int_D (x, y) dx dy = \min \\ (x, y) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $D$  为非球面镜面的几何轮廓在  $x, y$  坐标下的投影区域。对于矩形非球面元件, 式(5)中积分区域  $D$  可以沿对称方向取矩形的一半。由于式(5)很难得到解析解, 因此使用数值方法求解。

经计算, 使用传统的“三点法”计算的最接近球面半径为 1 990. 905 mm, 与离轴非球面的偏差  $P-V$  值为 133. 27  $\mu\text{m}$ , RMS 值为 107. 8  $\mu\text{m}$ ; 经

优化后, 最接近球面的半径为 1 986. 36  $\mu\text{m}$ , 偏差的  $P-V$  值为 40. 71  $\mu\text{m}$ , RMS 值为 25. 66  $\mu\text{m}$  (图 2)。可见, 该算法明显降低了非球面加工材料去除量, 可以大幅度提高加工效率。

#### 4 数控研磨及研磨阶段检验

最接近球面铣磨成型后, 非球面加工进入研磨阶段。在研磨阶段, 采用了面形轮廓测量技术作为检验手段。图 2 为凹面镜检验的实物照片, 检测设备为长春光机所自行研制的 AP-100 型非球面轮廓测量仪<sup>[7-8]</sup>。

在已知面形误差分布的情况下, 采用自行开发的计算机虚拟加工软件, 可以对数控参数进行求解和评价。计算机虚拟加工分为数据插值、小磨头工作函数计算<sup>[9]</sup>和数控参数求解与显示等 3 个步骤, 图 3 为计算机虚拟加工程序的界面。图 3 中左上图为设定的加工轨迹, 中上图为离轴镜轮廓测量数据经插值后获得的面形误差分布, 右上图为虚拟加工结果。加工结果显示, 该算法的收敛效果较好。

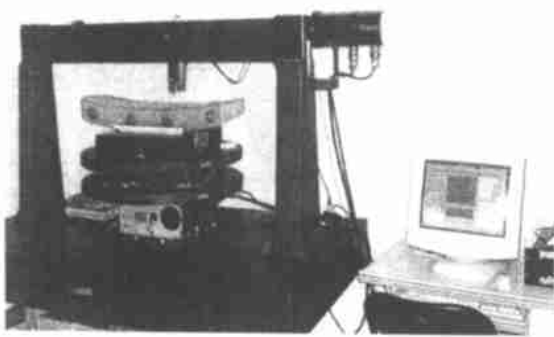


图 2 AP-100 型非球面面形轮廓仪  
Fig. 2 Photograph of AP-100 profilometer

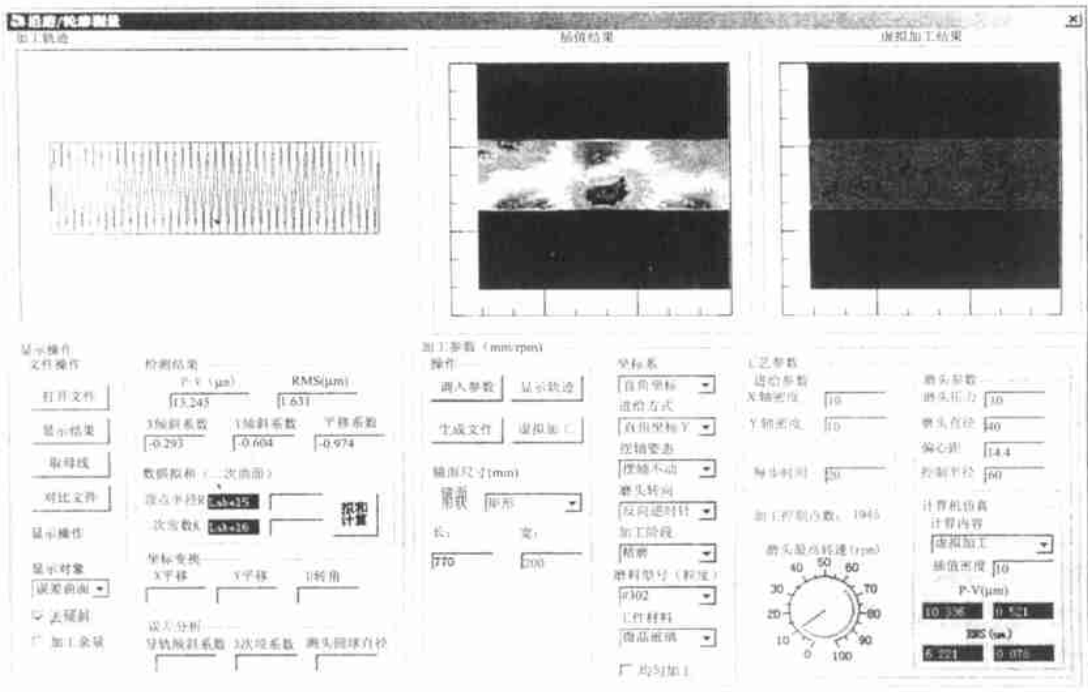


图 3 计算机虚拟加工程序及虚拟加工结果

Fig. 3 Interface of virtual manufacturing and its result

在研磨加工初期，面形精度为  $1.631 \mu\text{mRMS}$ ，经过十几个周期的数控研磨后，工件的面形精度收敛到  $0.625 \mu\text{mRMS}$ （见图 4），非球面加工可以转入抛光阶段。

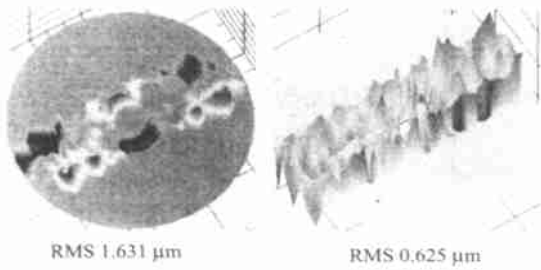


图 4 研磨阶段检验结果

Fig. 4 Test results of grinding stage

### 5 数控抛光及抛光阶段检验

数控抛光阶段采取了零位补偿检验技术作为检验手段，其加工过程与数控研磨类似。由于通用的商用干涉仪不能直接检验非球面光学元件，在干涉检验光路中使用一个“零补偿器”对被检件的非球面偏离量进行补偿，从而实现一定精度范围内的非球面干涉检验，被称为零位补偿检验。文中两个非球面的零位补偿检验的光学系统的检验精度均优于  $1/100 \text{ RMS}$ ，因此检验是可靠的。图 5 是这 2 块离轴非球面反射镜零位补偿检验的实物照片，图中可以看出，凸面离轴非球面的检验采用了“透射式”的检验方法。获取干涉检验结果后，仍可以采用虚拟加工的方法对数控参数进行求解和评价。经十几个周期的数控抛光，凹面镜和凸面镜的面形精度分别达到了  $8.22 \text{ nmRMS}$  和  $14.6 \text{ nmRMS}$ ，满足了设计要求。

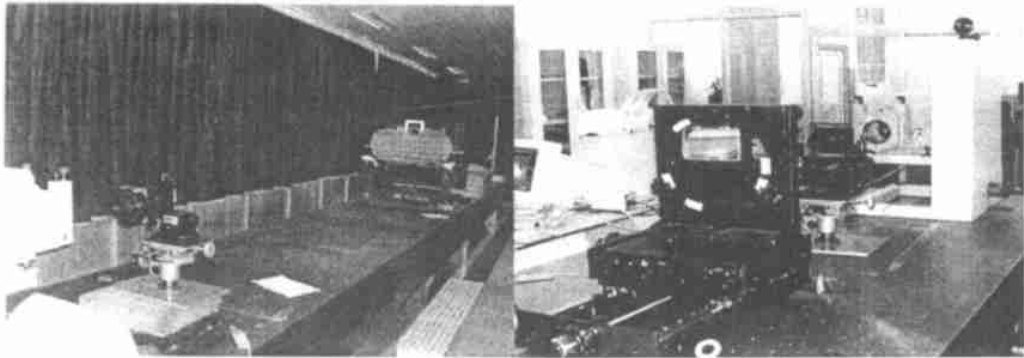


图 5 离轴非球面检验光路布置实物照片

Fig. 5 Photograph of null testing layout of two off-axis aspherical mirrors

### 6 结论

如图 6 所示，凸面和凹面非球面镜的最终检验结果显示其加工精度分别达到了  $0.023$  和  $0.013 \text{ RMS}$  ( $= 632.8 \text{ nm}$ ，见图 6)，满足了设计要求。证明使用 CCOS 技术加工矩形离轴非球面是可行的，加工参数和数控代码的设置及算法合理而有效。

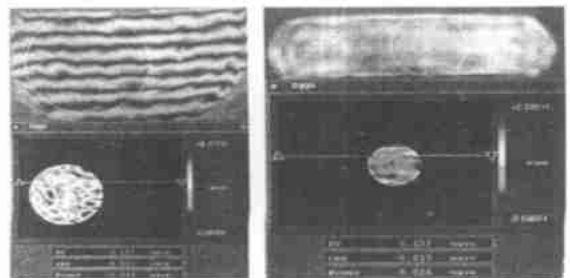


图 6 非球面镜的最终加工精度

Fig. 6 Final results of the two mirrors

**参考文献:**

- [1] JURANEK H J. Off-axis telescopes-the future generation of earth observation telescopes [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 104-122.
- [2] PAUL M. Compact three-mirror anastigmat with reflective lens [J]. *SPIE*, 1998, 3482: 282-293.
- [3] POLLICOVE H M. Innovations in deterministic optical manufacturing processes [J]. *SPIE*, 2002, 4921: 16-19.
- [4] 谌桂平, 杨力. 计算机数控应力盘面形研究 [J]. *光电工程*, 2000, 27 (3): 20-23.  
CHEN G P, YANG L. Study on surface shape of stress tool [J]. *Optics and Electric Engineering*, 2000, 27 (3): 20-23. (in Chinese)
- [5] MARACALA D. *Optical shop testing 2nd edition* [M]. John Wiley & Sons Inc, Appendix 1, 1992, 743-753.
- [6] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 北京: 科学出版社, 1991, 168-179.  
PAN J H. *Design, fabrication and test of aspheric optical surfaces* [M]. Beijing: Science Press, 1991, 168-179. (in Chinese)
- [7] WANG Q D. Novel profilometer with dual digital length gauge for large aspherics measurement [J]. *SPIE*, 2000, 4231: 39-46.
- [8] ZHENGL G. Fabrication of an off-axis lightweight aspheric mirror [J]. *SPIE*, 2002, 4921: 134-139.
- [9] 王权陡. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较 [J]. *光学精密工程*, 1999, 7 (5): 73-80.  
WANG Q D. Comparing the feature of small polishing tools in different movement style [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7 (5): 73-80. (in Chinese)

**作者简介:** 郑立功 (19-), 男, 吉林长春人, 1992年毕业于吉林工业大学机械工程系, 现为中科院长春光机所在读博士研究生, 主要研究方向为先进光学制造技术。联系电话: 0431-5261576, 传真: 0431-5603839, E-mail: ligongz@yahoo.com