

文章编号 1004-924X(2007)04-0499-06

# 摆臂式非球面轮廓仪的原理与试验

贾立德, 郑子文, 戴一帆, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**介绍了一种新颖的非球面轮廓仪的测量原理和测量试验,它通过测量非球面与某一参考球面之间的偏离量来唯一确定非球面的面形误差,通过调整测量臂长以及回转轴线与光轴之间的夹角实现对不同非球面的测量。系统主要由高精度二维转台,高刚度测量臂,四自由度微调系统和高精度扫描测量传感器组成,并分别在 VC++6.0 与 MATLAB 平台上开发了测控软件以及数据处理软件。该测量方法的优点是测量所需传感器量程小,测量运动为一个简单的回转运动;缺点是测量调整自由度多,校准困难。建立了测量系统的数学模型,通过测量数据与名义面形之间的非线性优化,在获得面形误差的同时获得了非球面面形参数误差。通过测量多条截线实现了对非球面面形的全口径检测。最后对直径 200 mm,顶点曲率半径 1 400 mm 的凹形抛物面镜进行了测量,结果表明,系统重复精度优于  $0.8 \mu\text{m}$ ,精度优于  $1 \mu\text{m}$ 。

**关键词:**非球面;摆臂式轮廓仪;面形测量;接触式检测

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Principle and experiments of swing-arm profilometer

JIA Li-de, ZHENG Zi-wen, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi

(School of Mechtronic Engineering and Automation, National University of  
Defense Technology, Changsha 410073 China)

**Abstract:** The geometric principle of a swing-arm profilometer as a novel method to measure aspherics are introduced. The surface error of an asphere is obtained by testing its relative departure from some reference sphere, and different reference spheres are realized by adjustment of the length of the swing-arm and the angle between rotary axis and optical axis. A measuring set-up is built based on this principle, which consists of an ultra-precise 2-axes rotating-table, a high stiffness, lightweighted measurement arm, a 4-DOF stage and a scanning sensor, the testing software and data-processing software are programmed with the VC++6.0 and Matlab platform, respectively. The profilometer has advantages in shorter measuring range for a sensor and simple rotary measuring motion, and the disadvantages in complicated calibration and large DOF adjustment. A mathematic model is established to gain the error of conic aspheric parameters and surface error based on the nonlinear optimization of measured data and nominal figure, and the full-aperture of a 3D asphere is tested by measuring several transversals. Finally, a grinded paraboloid ( $D=200 \text{ mm}$ ,  $R=1400 \text{ mm}$ ) is tested, results indicate that the system has a good repeatability ( $<0.8 \mu\text{m}$ ) and accuracy ( $<1 \mu\text{m}$ ).

**Key words:** aspherics; swing-arm profilometry; profile measurement; contact measurement

收稿日期:2006-04-22;修订日期:2006-11-18.

基金项目:高等学校博士学科点基金资助项目(No. 20049998013)

## 1 引言

随着现代科学技术的发展,光学非球面由于其优异的光学性能,在空间相机、大型望远镜以及红外导引等国防关键技术领域以及民用光电产品方面有着越来越重要的广泛应用。然而高精度高质量的非球面加工和检测技术一直是难点,是制约非球面进一步广泛应用的瓶颈。严格来讲,非球面的加工和检测技术是一个整体,加工—检测—再加工—再检测是非球面加工的必经过程。在某种程度上,获得高质量非球面的关键在于能否提供可靠的、行之有效的检测来指导加工。非球面精磨、粗抛阶段的检测是影响非球面形收敛精度与速度的关键阶段。此时面形误差尚未达到光波长量级,且表面粗糙度不佳,通常的干涉检测方法存在一定的困难。尽管  $\text{CO}_2$  红外干涉仪从理论上讲是非球面形精磨粗抛阶段的最理想检测方法,但是红外干涉仪价格十分昂贵,而且研制周期长,材料难寻,光不可见<sup>[4]</sup>。接触式检测方法的精度通常在微米亚微米量级上,满足了精磨粗抛阶段对检测精度的要求,而且相对简单,成本较低。尤其是在大型光学非球面的铣磨和研抛阶段,非球面面形的高精度在位测量是决定面形收敛精度以及收敛速度的关键。摆臂式非球面面形轮廓仪就是专门为解决大型非球面面形的在位测量问题而研制的。摆臂式非球面面形轮廓仪的测量原理最早是由美国 Arizona 大学光学加工中心的 David S. Anderson 等人提出的<sup>[3]</sup>,并成功应用于多种直径 1~2 m 次镜的在位检测加工过程中,其测量精度高达 50 nm<sup>[1-3]</sup>;德国 LOH 公司也对类似测量原理的非球面面形轮廓仪进行了研究,但主要是针对口径为 10~200 mm 的小型非球面,并形成了商用化产品,其具体的性能指标有:测量工件的口径为 10~200 mm;可以对球面和非球面进行 2D 和 3D 的测量;凸面形状可以从平面到超半球,凹面受限于孔径角;仪器分辨力 3 nm;量程 2 mm;测量力 0.02 N;相对测量精度 0.06  $\mu\text{m}$ ,半径精度取决于使用的标定球面,测量方式为接触式扫描测量<sup>[6,7]</sup>。

## 2 测量原理

非球面即与球面有偏离的表面。任何一个非球面都可以通过其最接近球面和相应的偏离量(非球面度)来唯一确定。通过测量非球面与其最接近球面之间的非球面度即可实现非球面面形的高精度测量。图 1 所示为测量凸非球面时的测量原理,测量凹非球面时的测量原理与此类似,不再赘述。

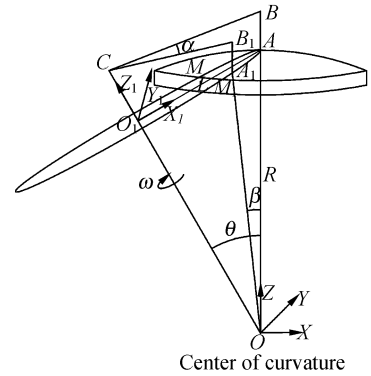


图 1 测量凸非球面原理图

Fig. 1 Geometry principle of swing-arm profilometry

如图 1 所示,假设被测工件顶点曲率半径为  $AO=R$ ,顶点为  $A$ ,曲率中心为  $O$ ,坐标系  $(X, Y, Z)$  的原点为  $O$ , $Z$  轴为工件的光轴方向, $X, Y, Z$  满足右手规则。 $CO$  为测量回转轴, $BC$  为测量臂, $AB$  为传感器部分, $A$  为测量点, $AO_1 \perp CO$ ,坐标系  $(X_1, Y_1, Z_1)$  原点为  $O_1$ , $Z_1$  为方向, $X_1$  为方向, $X_1, Y_1, Z_1$  满足右手规则, $AO_1=L$ 。回转轴  $CO$  与光轴  $AO$  夹角为  $\theta$ ,同时回转轴  $CO$  与光轴  $AO$  相交与  $O$  点。当测量系统  $ABC$  绕回转轴  $CO$  转动时  $A$  的轨迹即测量轨迹为  $MAA_1M_1$ 。当测量系统转动过角度  $\alpha$  时, $A_1O$  与  $AO$  夹角为  $\beta$ 。

测量点  $A$  在坐标系  $(X_1, Y_1, Z_1)$  下的运动轨迹为

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = L^2 \\ z_1 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

坐标系  $(X_1, Y_1, Z_1)$  与  $(X, Y, Z)$  之间的相互关系为:

$$r_i = [C_{ij}]r_j + t_j, \quad (2)$$

其中  $r_i = (x_1, y_1, z_1)^T$ ,  $r_j = (x, y, z)^T$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$t_j = (0, 0, -L \tan \theta)^T$$

测量点 A 在坐标系(X,Y,Z)下的轨迹方程为:

$$\begin{cases} \frac{y^2}{\sin^2 \theta} + (z + x \frac{\cos \theta}{\sin \theta})^2 = (\frac{L}{\sin \theta})^2 \\ z \cos \theta - x \sin \theta = L \tan \theta \end{cases}, \quad (3)$$

令  $R = \frac{L}{\sin \theta}$ , 则可以得到:

$$\begin{cases} \frac{y^2}{\sin^2 \theta} + (z + x \frac{\cos \theta}{\sin \theta})^2 = R^2 \\ z \cos \theta - x \sin \theta = R \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

由式(4)可知测量点的轨迹总是处在半径为 R 的球面上。

由图 1 可知测量轨迹  $MAA_1M_1$  不是球面  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$  上的子午截线, 因此, 测量非球面时得到的量是非球面沿轨迹  $MAA_1M_1$  与半径为 R 的球面的偏离量。图 2 是半径  $R = 1\ 000$  mm, 口径  $D = 400$  mm, 倾斜角  $\theta = 30^\circ$  时的理想测量轨迹, 图 3 是测量轨迹在 XY 平面内的投影图。其中  $AMOM'A'$  为测量轨迹在 XY 平面内的投影,  $BOB'$  为子午截线在 XY 平面内的投影, 二者的夹角为  $\gamma$ 。

$$\sin \gamma \approx \frac{x}{D/2} = \frac{D \tan \theta}{2(\sqrt{R^2 - (\frac{D}{2})^2} + R)}, \quad (5)$$

由式(5)可以得到偏离角度为  $\gamma = 10.07^\circ$ 。

当测量臂转过角度  $\alpha$  时, 测量角度  $\beta$  为

$$L * \sin \frac{\alpha}{2} = R * \sin \frac{\beta}{2}, \quad (6)$$

假设被测非球面的理想面形方程为:

$$Z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}}, \quad (7)$$

其中 c 是曲率,  $c = 1/R$ , k 是二次项系数。

假设测量臂长为 l, 倾斜角度为  $\theta$ 。由工件坐标系和测量坐标系之间的相互转换关系可以得到理想条件下的测量值  $A(\alpha)$  以及测量点的径向位置  $d(\alpha)$  分别为:

$$\begin{cases} A(\alpha) = \sqrt{x^2 + y^2 + (Z(x, y) - R)^2} - R \\ d(\alpha) = \sqrt{x^2(\alpha) + y^2(\alpha)} = L \sqrt{\cos^2 \theta (\cos \alpha - 1)^2 + \sin^2 \alpha} \end{cases}, \quad (8)$$

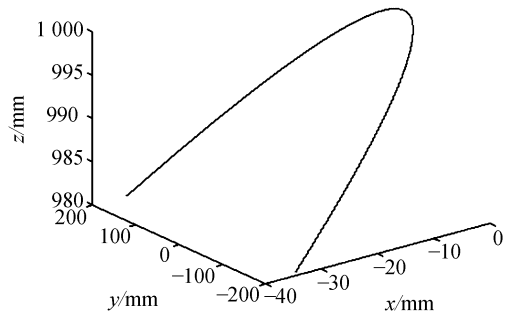


图 2 三维直角坐标下的测量轨迹图  
Fig. 2 Measuring trace in 3D space

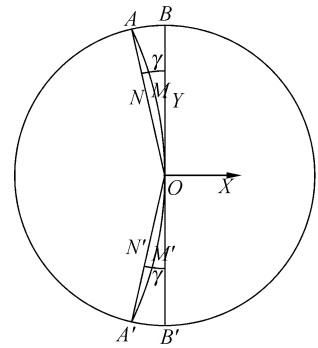


图 3 测量轨迹在 XY 平面内的投影图  
Fig. 3 Projection of trace in XY plane

其中  $\begin{cases} x(\alpha) = L \cos \alpha \cos \theta - R \cos \theta \sin \theta \\ y(\alpha) = L \sin \alpha \end{cases}$

由式(8)可知测量点的径向位置与扫描角度之间并不是线性变化的。图 4 是图 2 仿真条件下径向位置随扫描角度的变化曲线, 图 5 是其非线性误差。可见, 其非线性  $< 1\ \text{mm}/200\ \text{mm} = 0.5\%$ 。

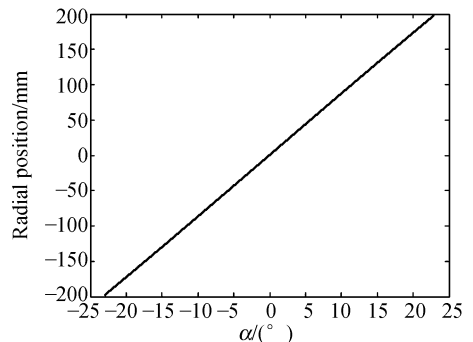


图 4 径向位置与扫描角度之间的变化关系  
Fig. 4 Relation between radial position and scan angle

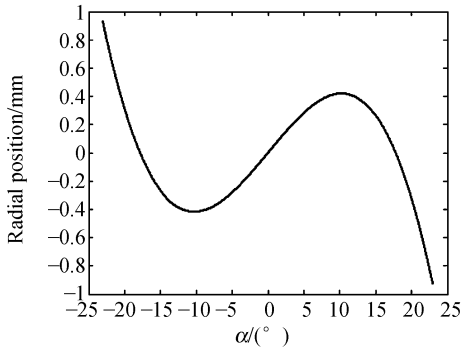


图 5 径向位置与扫描角度之间的非线性

Fig. 5 Nonlinearity between radial position and scan angle

### 3 系统软硬件结构的设计

基于上述测量原理,设计了如图 6 所示的测量试验系统。

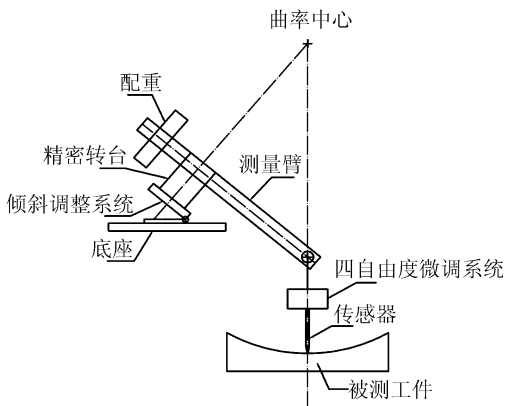


图 6 测量系统示意图

Fig. 6 Schematic of the system

实际测量系统中,6、7 部分是在两轴精密转台上实现的。它可以同时实现高精度高刚度的测量回转运动和倾斜的调整,通过调整转台的倾斜角,可以实现对凸形和凹形非球面的测量。测量臂采用了硬质合金铝空心管状结构,以减轻质量提高刚度。四自由度微调系统可以分别实现对图 1 所示坐标系中的  $X, Y, Z, B$  方向进行调整。调整  $X, Y$  方向可以调整测头与非球面顶点的对中;  $Z$  方向的调整可以保证测头与工件之间的接触在传感器的合理量程范围内;  $B$  方向的调整可以减小传感器与被测非球面光轴之间的倾斜。传感器为自行研制的电感式高精度扫描测量传感

器,分辨力为  $0.01 \mu\text{m}$ ,量程为  $\pm 300 \mu\text{m}$ 。同时分别在 VC++6.0 和 MATLAB 平台上编制了测控软件与数据处理软件。

### 4 测量试验

为验证测量方法的正确性及测量系统的精度,对铣磨后的小尺寸工件进行了初步测量,并与自行研制的光学坐标测量机的测量结果进行了对比,其测量结果的不确定度为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。测量了直径  $200 \text{ mm}$ ,顶点曲率半径为  $1\,400 \text{ mm}$  的凹形抛物面镜两条在顶点处切线相互垂直的截线,并分别测量四次以验证其重复性。图 7 是截线 1 四次测量的结果,计算得到测量时的参考圆半径为  $1\,405.63 \text{ mm}$ ,非球面顶点曲率半径为  $1\,399.997 \text{ mm}$ ,面形误差如图 7 所示。图 8 为截线 2 四次测量的结果,计算得到参考圆半径为  $1\,405.53 \text{ mm}$ ,非球面顶点曲率半径为  $1\,399.999 \text{ mm}$ ,面形误差如图 8 所示。图 9 为全口径的面形

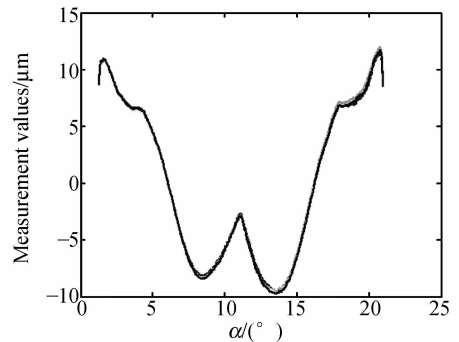


图 7 截线 1 的四次测量结果

Fig. 7 Four results of transversal 1

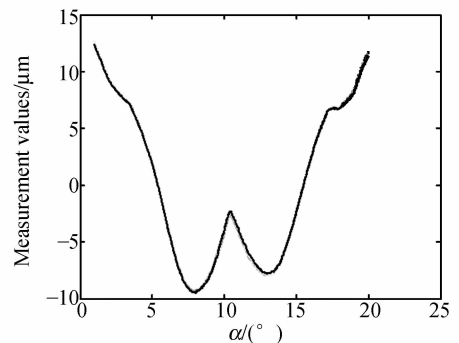


图 8 截线 2 的四次测量结果

Fig. 8 Four results of transversal 2

误差检测结果,计算得到顶点曲率半径为 1 399.994 mm,面形误差  $PV=7.51 \mu\text{m}$ ,  $RMS=2.12 \mu\text{m}$ 。图 10 为相应的三坐标检测结果,顶点曲率半径为 1 399.712 mm,面形误差  $PV=8.08 \mu\text{m}$ ,  $RMS=2.09 \mu\text{m}$ 。

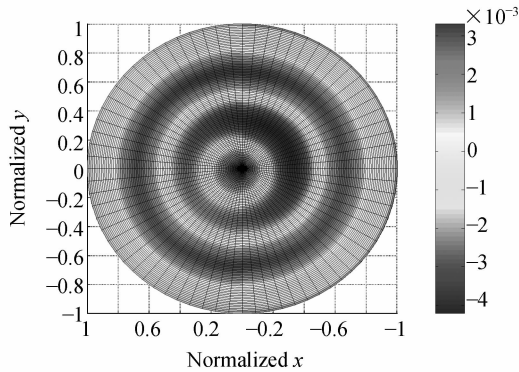


图 9 全口径检测结果

Fig. 9 Full-aperture results with swing-arm profilometer

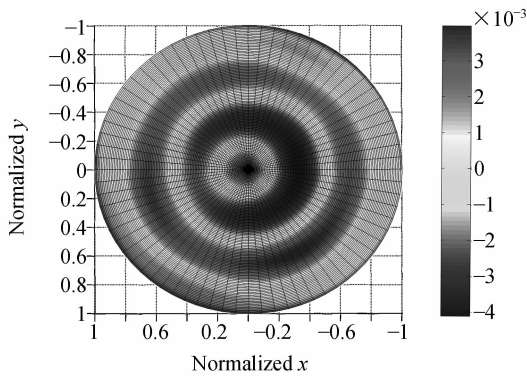


图 10 三坐标全口径检测结果

Fig. 10 Full-aperture results with CMM



图 11 测量试验系统实物图

Fig. 11 System's photo

## 5 结 论

介绍了一种新颖的非球面面形测量方法与试验装置。这种方法是通过巧妙的几何学、高精度转台、高精度扫描测量传感器与计算机控制来实现的。理论上,这种方法所需要的传感器测量量程仅仅是被测非球面的非球面度,从而大大减小了所需要的测量量程。同时测量运动仅仅是一个回转运动,更容易获得高的测量精度。经过多次实际测量试验与对比,当前系统的重复精度优于  $0.8 \mu\text{m}$ ,精度优于  $1 \mu\text{m}$ 。其不足之处是测量臂的校准困难,调整自由度多。这些都需要进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] MARTIN H M, BURGE J H, VECCHIO C D, *et al.*. Optical fabrication of the MMT adaptive secondary mirror [J]. *SPIE*, 2000, 4007: 502-507.
- [2] SMITH B K, BURGE J H, MARTIN H M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes [J]. *SPIE*, 1997, 3134: 51-61.
- [3] ANDERSON D S, BURGE J H. Swing-arm profilometry of aspherics [J]. *SPIE*, 1995, 2536: 169-179.
- [4] 唐健冠. 大口径非球面精磨表面形状检测技术研究[D]. 中国科学院成都光电所, 2001.  
TANG J G. *Research on testing techniques for large aperture aspherical surface in the fine grinding stage* [D]. Chengdu Institute of optics & electronics, Chinese Academy of Science, 2001. (in Chinese)
- [5] 王权陡. 计算机控制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, 2001.  
WANG Q D. *Study on computer controlled manufacturing technology of off-axis aspherics* [D]. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2001. (in Chinese)

- [6] <http://www.loh.de>[Z]
- [7] 薛栋林,张忠玉,张学军.一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J].光学精密工程,2005,13(2):198-204.  
XUE D L,ZHANG ZH Y,ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):198-204. (in Chinese)
- [8] 辛企明.光学塑料非球面制造技术[M].北京:国防工业出版社,2005.  
XIN Q M. *Manufacturing Technology of Plastic Aspheric Lens* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [9] ELLISON J,STEVEN V. Characterization of symmetric aberrations in aspheric surfaces using non-contact profilometry[J]. *SPIE*, 2003,5180:347-354.
- [10] 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 profilometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(6):612-616. (in Chinese)

作者简介:贾立德(1981—),男,博士研究生,主要从事光学非球面检测技术方面的研究。E-mail: jiazhonghua135@yahoo.com.cn