

doi: 10.3788/gzxb20124104.0379

# 激光跟踪仪检验非球面面形的方法

王孝坤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

**摘 要:**通过扩充激光跟踪仪的现有功能,提出了一种适用于非球面研磨和粗抛光阶段以及中低准确度非球面面形的快速检测方法.分析了测试原理,设计规划了检测流程.利用激光跟踪仪的靶标球对非球面表面进行多点接触测量,并将测量的结果与非球面 CAD 模型进行分析对比、处理和运算,获得非球面的面形分布信息.结合实例对一口径为 420 mm×270 mm 的离轴非球面进行了面形检测,并与零位补偿结果进行对比,结果表明,两种方法测试的面形误差分布是一致的,其峰值值和均方根值的相对偏差分别仅为 6.22% 和 3.37%.该方法无需其它辅助光学元件就能够准确地实现对大口径非球面面形的检测,测试数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行.

**关键词:**光学检测;非球面;面形误差;激光跟踪仪

**中图分类号:**TQ171.65;O436.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2012)04-0379-5

## 0 引言

在光学系统中采用非球面光学元件,不仅可以降低系统的复杂程度,而且可以大幅度提高系统性能.因此,非球面光学元件是军用、民用高性能光学系统的核心元器件,在航空、航天遥感,天文观测、深空探测和光电跟踪仪器,光刻物镜,高性能照相(摄像)机镜头等诸多光电仪器领域具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>.

与传统的球面光学元件相比,非球面具有很高的加工、检测难度,是限制其广泛应用的主要技术瓶颈.当前,检验非球面元件的方法有很多种,主要分为接触式测量和非接触式测量.接触式测量主要借助轮廓仪或者三维坐标测量仪通过对光学元件进行多个离散点的测量,然后经过数据处理,拟合得到面形误差<sup>[4-6]</sup>.非接触式测量主要有阴影法、激光扫描法、干涉法等<sup>[7-9]</sup>.阴影法主要分为刀口法和哈特曼法,该方法主要观察阴影分布的图形和阴影图的明暗对比.这种方法设备简单,对于某些二次曲面测量方便,适于现场检验.但存在主观、定量困难、灵敏度欠高等缺点.激光扫描法可分平移法、旋转法,以及平移旋转法,这是一种利用光的直线性进行面形检测的方法,通过用激光束对被测面进行逐点测量可计算出非球面的面形参量.它通用性强,可以测量各种非球面,而且是对被测面进行绝对测量,准确度高,缺点是相应的数据处理比较复杂.干涉法是一种

短时间检测非球面的方法,它具有高分辨、高准确度、高灵敏度、重复性好等优点<sup>[10-13]</sup>,但是利用该技术测量非球面面形时,需要专门设计和制造补偿元件.此外,非接触式光学测量要求非球面表面有很好的光洁度和很高的反射能力,甚至很好的面形,因此它们一般适用于非球面精抛光和最终阶段的检测,而对于非球面研磨和粗抛光阶段以及中低准确度非球面面形的测量却很难实现.

本文通过扩充激光跟踪仪的现有功能,利用激光跟踪仪的靶标球对非球面表面进行多点接触测量,通过分析对比,可以很好地获得非球面的面形分布信息.该方法主要适用于非球面研磨和粗抛光阶段和中低准确度非球面的面形检测,它无需其他辅助光学元件就能够直接实现对非球面的测量,数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,测量时间短、测试成本低.

## 1 基本原理

激光跟踪仪检验非球面面形实验装置如图 1,包括计算机、激光跟踪仪、靶标球和待测非球面,激光跟踪仪与计算机进行数据相连.激光跟踪仪是一种高准确度、大容量的便携式三维坐标测量设备,该跟踪仪使用两个旋转角编码器和一个激光距离测量系统,以跟踪和测量靶标球的位置,通过靶标球与待测非球面表面的接触可以测定在跟踪仪系统坐标下

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61036015)和国家高技术研究发展计划(No. O8663NJ090)资助

**第一作者:**王孝坤(1980—),男,副研究员,博士,主要研究方向为先进光学制造技术. Email: jimwxk@sohu.com

**收稿日期:**2011-10-18; **修回日期:**2011-11-28

该点的坐标值. 激光跟踪仪一般用来测量物体之间的相对位置关系, 并可以直接检验平面和球面物体的面形, 但是对于非球面尤其是离轴非球面的面形却不能实现直接检验.

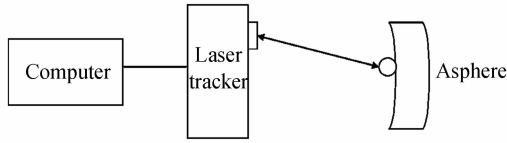


图 1 测量实验装置  
Fig. 1 Sketch of setup for testing asphere

为了解决上述技术问题, 激光跟踪仪检验非球面面形方法的流程如图 2.

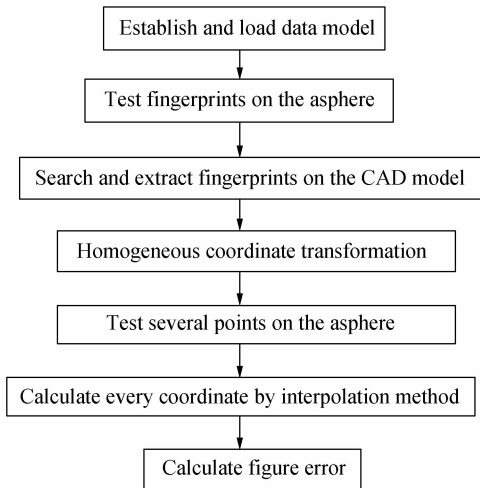


图 2 测试流程  
Fig. 2 Flow chart of testing

首先, 建立待测非球面的 CAD 模型, 并将该数据模型导入跟踪仪的计算机测量软件中. 其次, 利用激光跟踪仪测量待测非球面侧面或者背部的三个特征点  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_3$  的位置坐标  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$ , 图 3 是待测非球面结构. 特征点为待测非球面侧面或者背部的轻量化圆孔、锥孔的圆心或者三角形孔的中心. 可通过先测量圆孔或锥孔边缘上任意三个点的坐标, 然后再计算得到其圆心坐标; 三角形孔中心的坐标可利用三角形三个顶点的坐标通过计算得到.

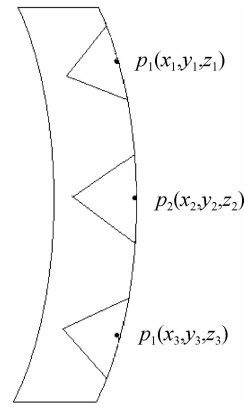


图 3 待测非球面结构  
Fig. 3 Sketch of configuration of asphere

然后, 查找非球面的 CAD 模型, 提取与测量的特征点  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  相对应的 CAD 数模上的特征点的位置坐标  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  和  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$ . 通过齐次坐标变换, 可以求解得到两个坐标系之间的平移量和旋转量, 从而使得待测非球面此时的物理坐标系与 CAD 模型的坐标系一致.

算法步骤如下:

设定  $p_1$  点在待测非球面的物理坐标系中的齐次坐标表示为行矩阵  $(x_1, y_1, z_1, 1)$ , 与  $p_1$  相对应的  $P_1$  点在 CAD 模型坐标系中的齐次坐标表示为行矩阵  $(X_1, Y_1, Z_1, 1)$ ; 假定待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向上的平移量分别为  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$ ; 待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转动角度量分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ . 则根据齐次坐标变换理论, 待测非球面的物理坐标系上的特征位置坐标与 CAD 模型上对应特征的位置坐标有式(1)的关系

$$\begin{cases} (x_1, y_1, z_1, 1) = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \cdot V \\ (x_2, y_2, z_2, 1) = (X_2, Y_2, Z_2, 1) \cdot V \\ (x_3, y_3, z_3, 1) = (X_3, Y_3, Z_3, 1) \cdot V \end{cases} \quad (1)$$

式中  $V$  为两个坐标系之间的变换矩阵, 它是平移变换矩阵  $T$  和旋转变换矩阵  $R$  之间的乘积, 即

$$V = T \cdot R \quad (2)$$

$$T = T_x \cdot T_y \cdot T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_x & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_y & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_z & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $T_x$ 、 $T_y$  和  $T_z$  分别为两个行矩阵在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向上的平移矩阵.

$$R = R_x \cdot R_y \cdot R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $R_x$ 、 $R_y$  和  $R_z$  分别为两个行矩阵在在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向上的旋转矩阵. 则由(3)~(4)可推导得到两个坐标系之间的变换矩阵  $V$  为式(5)

$$V = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因为三个特征点分别在两个坐标系中的坐标值是已知的,通过迭代法求解式(1)和式(5)联立的非线性方程组,即可得到待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向上的平移量  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  以及待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转动角度量  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,从而可以将两个坐标系统一起来.

两个坐标系一致后,利用激光跟踪仪测量在同一坐标系下非球面上多点的位置坐标. 然后对测量得到的坐标数据进行三次样条插值计算,即可求解得到非球面上各点的位置坐标.

最后,分析求解得到统一坐标系下待测非球面上各点的坐标值与对应 CAD 数模上各点坐标值的偏差,即为待测非球面的面形分布.

## 2 准确度分析

激光跟踪仪的高准确度选项-干涉仪的最大允许误差为  $2 \mu\text{m} + L \cdot 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$ ,其中  $L$  为激光跟踪仪与待测物体之间的距离,测量时一般可以将激光跟踪仪与待测非球面镜的距离控制在  $2 \text{ m}$  以内,因此测量误差可以控制在  $3 \mu\text{m}$  以内.

分析可得,激光跟踪仪仅适用于中低准确度非球面的检验,尤其能快速完成非球面研磨和粗抛光阶段面形的测量,因为此时非球面的面形误差还比较大,且表面光洁度不够好.

此外,由于跟踪仪测量包括两个角度测量和一个距离测量,如果用跟踪仪测量的特征基本上是沿着光速通路的方向,角度编码器的移动将会很小,其测量准确度将会大幅提高. 因此,测量时我们将跟踪仪的主机出光孔基本沿着镜面方向安置,角度编码器引入的误差将会很小,检测准确度将会提升.

## 3 检测实验

结合实例对一口径为  $420 \text{ mm} \times 270 \text{ mm}$  的离轴非球面进行了面形检测,该非球面为双曲面,其中

二次曲面常量为  $-2.173$ ,离轴量为  $75.1 \text{ mm}$ ,顶点曲率半径为  $2372.34 \text{ mm}$ ,轻量化率达到了  $70\%$ ,待测非球面背部的特征如图 4,选择镜体边缘的四个三角孔的中心点作为特征点. 选取的三角孔为图中标注的  $1 \sim 4$ ,三角孔位经过超精密数控机床 DMG 精密加工,形位加工准确度将优于  $5 \mu\text{m}$ . 其中特征孔位  $1 \sim 3$  用于求解待测非球面的物理坐标系和 CAD 模型坐标系之间的坐标变换关系,孔位  $4$  用于校验和判断待测非球面的物理坐标系和 CAD 模型坐标系之间的匹配关系.

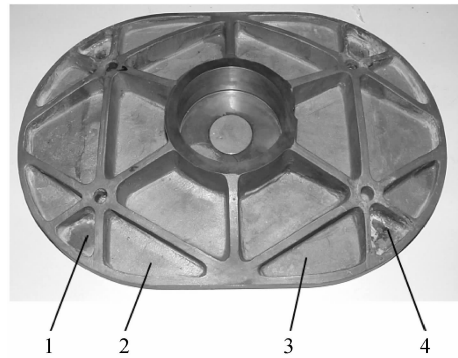


图 4 待测非球面背部特征图片

Fig. 4 Picture of asphere with backside

首先将跟踪仪的主机出光孔沿着镜面方向安置,由于所测量的非球面背部和侧面开放,可以同时探测到镜面坐标和 4 个三角孔的位置坐标(对于三明治等背部不是开放结构的非球面,将存在断光,不能同时探测到镜面坐标和特征点位置坐标,可以利用 2 台跟踪仪建立基站,通过坐标迭代统一即可解

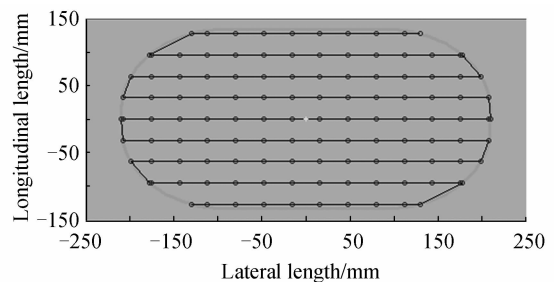


图 5 测量轨迹分布

Fig. 5 Distribution of testing track

决该问题),测量得到 4 个三角孔位中心的位置坐标和待测非球面的镜面坐标. 测量点轨迹基本分布如图 5,共有 124 测量点.

通过迭代法求解得到待测非球面的物理坐标系和 CAD 模型坐标系之间的坐标变换系数,两坐标统一后复查孔位 4 在待测非球面的物理坐标系变换后的坐标为  $Q_1$  (180. 433 mm, -117. 652 mm, -7. 572 mm),同一点在 CAD 模型坐标系中的坐标为  $Q_2$  (180. 425 mm, -117. 644 mm, -7. 568 mm),  $Q_1, Q_2$  两点之间的距离为 0. 011 mm,经计算镜面上窜动 0. 011 mm 带来的矢高变化最大值将小于  $1 \mu\text{m}$ ,因此可以判定两个坐标系之间的转换是满足测量准确度要求的.

其次,为了与干涉仪测量数据对比和后续的加工文件的生成,对测量所得的面形进行了三次样条插值计算,得到其面形误差分布如图 6,其峰谷值(Peak to Vally, PV)和均方根(Root Mean Square, RMS)值分别为  $11.671\lambda$  和  $1.869\lambda$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ).

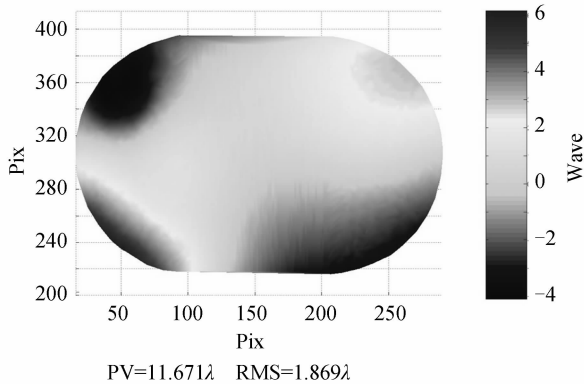
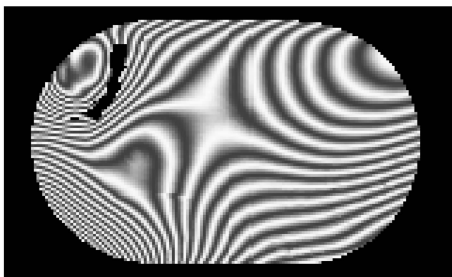
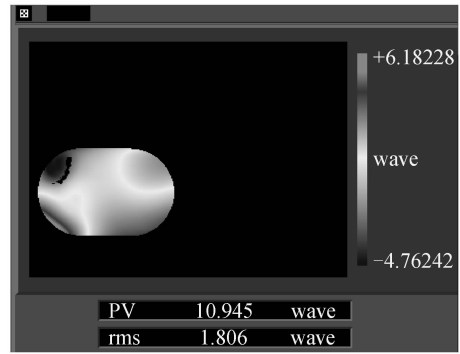


图 6 激光跟踪仪测量面形分布  
Fig. 6 Phase map testing by laser tracker

为了对比和分析,并验证该方法检测的准确性,对该非球面进行了零位补偿检测,检测结果如图 7,其 PV 值和 RMS 值分别为  $10.945\lambda$  和  $1.806\lambda$ ,由于该非球面刚进入抛光阶段,局部干涉条纹很密,甚至有缺失部分. 分析可得:两种方法测试的面形误差分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别仅为  $0.726\lambda$  和  $0.063\lambda$ ,其 PV 值和 RMS 值的相对偏差分别仅为 6. 22% 和 3. 37%. 同时,计算两种方法面



(a) Interferogram by null testing



(b) Phase map by null testing

图 7 零位补偿测量干涉图和面形分布  
Fig. 7 Phase map and interferogram by null testing

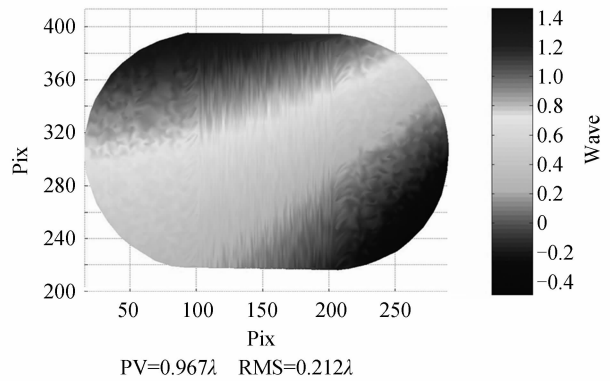


图 8 两种测试方法面形残差分布  
Fig. 8 Residual error between the two methods

形残差的分布如图 8,其 PV 值和 RMS 值分别为  $0.967\lambda$  和  $0.212\lambda$ .

### 4 结论

针对非球面研磨和粗抛光阶段光学检测的困难,提出了利用激光跟踪仪测量非球面形的方法,该方法还适用于中低准确度非球面的快速检验. 将激光跟踪仪与待测非球面的距离控制在 2 m 范围以内,跟踪仪的测量误差将小于  $3 \mu\text{m}$ . 结合工程实例利用跟踪仪对一口径为  $420 \text{ mm} \times 270 \text{ mm}$  的离轴非球面进行了面形检测,并与零位补偿干涉结果进行对比,这两种测试方法面形残差的 PV 值和 RMS 值分别优于  $1\lambda$  和  $\lambda/4$ . 利用跟踪仪测量非球面面形的准确度与特征点的准确度、跟踪仪本身的系统误差、随机测量误差等因素有关,在以后的实践中我们将对其进一步分析和研究.

#### 参考文献

[1] HUXFORD R B. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[C]. SPIE, 2004, 5249: 230-237.  
 [2] CHANG Jun, WANG Yong-tian, ZHANG Ting-cheng, et al. All reflective zoom systems for infrared optics[C]. SPIE, 2006, 6342: 63421Q-1-63421Q-9.  
 [3] MARTIN H M, ZAPPELLINI G B, CUERDEN B, et al. Deformable secondary mirrors for the LBT adaptive optics system [C]. SPIE, 2006, 6272: 62720U-1-62720U-10.

- [4] WANG Quan-dou. Novel profilometer with dual digital length gauge for large aspherics measurement [C]. *SPIE*, 2000, **4231**: 39-46.
- [5] JING H, KING C, WALKER D. Simulation and validation of a prototype swing arm profilometer for measuring extremely large telescope mirror-segments[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3): 2036-2048.
- [6] BEUTLER A. 3D profilometry on aspheric and freeform lenses[C]. *SPIE*, 2011, **8082**: 80821J.
- [7] ZHAO Bin. Digital moiré fringe-scanning method for centering a circular fringe image[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(14): 2833-2839.
- [8] DRUZHIN V V, PURYAEV D T. Hartmann method for monitoring the shape of convex aspheric mirrors of large optical telescopes[J]. *Journal of Optical Technology*, 2007, **74**(12): 794-796.
- [9] XUE Chang-xi, HUO Fu-rong, LÜ Hui-ying. Method for testing aspheric surface with wavelength scanning interferometry[C]. *SPIE*, 2007, **6723**: 67231V1-67231V7.
- [10] WANG Ming, ZHANG Bin, NIE Shou-ping, *et al.* Radial shearing interferometer for aspheric surface testing [C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 673-676.
- [11] CORDERO R R, LIRA I. Uncertainty analysis of displacements measured by phase-shifting Moire interferometry[J]. *Optics Communications*, 2004, **237**(1-3): 25 - 36.
- [12] SONG J B, LEE Y W. Optical test for the primary mirror of a space telescope using a CGH null lens[C]. *SPIE*, 2006, **6034**: 60341M-1-60341M-6.
- [13] ZHANG Xue-jun, ZHANG Zhong-yu, LI Zhi-lai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror [C]. *SPIE*, 2007, **6721**: 672109-1-672109-5.

## Measurement of Aspherical Surfaces by Laser Tracker

WANG Xiao-kun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to test middle and low precision asphere and measurement of asphere during grinding and polishing, a new method by extending the ability of laser tracker is proposed. The testing principle is analyzed, and the testing procedure is devised. The coordinate of several points on the tested asphere can be measured by the laser tracker, and the figure error can be calculated by analyzing the testing data and CAD model of the asphere. An off-axial aspheric surface with the aperture of 420 mm × 270 mm is measured by this method, the surface map by this method is consistent to the entire surface map from the null test, and the relative error of the PV and RMS error between null test and this method is 6.22% and 3.37%, respectively. The proposed method provides another quantitative measurement for testing large aperture aspheres without any assistant optics, and the data processing and testing operation are very convenient.

**Key words:** Optical testing; Aspherical surface; Figure error; Laser tracker