

# 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形

李 杰<sup>1,2</sup> 伍 凡<sup>1</sup> 吴时彬<sup>1</sup> 匡 龙<sup>1</sup> 林常青<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 为满足离轴非球面镜在光学检验前的面形检测需求,对使用激光跟踪仪测量离轴非球面的方法进行了研究。详细介绍了使用激光跟踪仪测量离轴非球面的检测步骤及数据处理方法。使用激光跟踪仪对一处于研磨阶段的口径为 150 mm,顶点曲率半径为 1200 mm,离轴量为 240 mm 的离轴抛物面镜进行了测量,进行了测量不确定度分析与三坐标测量机的测量结果进行了比对。结果显示激光跟踪仪与三坐标测量机的面形测量峰-谷值一致性优于 1  $\mu\text{m}$ 。分析及实验结果表明此检测方法简单易行,灵活通用,适用于离轴非球面抛光前的面形检测。

**关键词** 测量;面形检测;离轴非球面;激光跟踪仪;研磨

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0112002

## Using a Laser Tracker to Measure the Surface of Off-Axis Aspheric Mirror During Grinding

Li Jie<sup>1,2</sup> Wu Fan<sup>1</sup> Wu Shibin<sup>1</sup> Kuang Long<sup>1</sup> Lin Changqing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to measure the off-axis aspheric surface before optical testing, method of using a laser tracker to measure the surface shape is investigated. The procedure and data processing method of the measurement are introduced. Using a commercial laser tracker, an off-axis parabolic mirror with an aperture of 150 mm, radius of curvature of 1200 mm, and off-axis distance of 240 mm is measured. The measurement uncertainty is analyzed and measurement result is compared with that of coordinate measuring machine. The result shows a peak-to-valley value consistency better than 1  $\mu\text{m}$ . The method is easy operation and flexible, and meets the measurement requirements of the off-axis aspheric mirror surface before polishing.

**Key words** measurement; surface measurement; off-axis aspheric; laser tracker; grinding

**OCIS codes** 120.6650; 120.4640; 120.4610; 120.3940

## 1 引 言

离轴非球面<sup>[1,2]</sup>由于其特殊的几何性质,在具有非球面良好成像特性的同时,将非球面在增大视场、简化结构、减小尺寸和降低重量等方面的优势发挥到极致,并很好地解决了由中心遮拦导致的系统成像质量下降问题。然而,由于离轴非球面的几何轴与光学轴不重合,其旋转不对称性导致在加工及测量中存在一定难度<sup>[3~5]</sup>。

激光跟踪仪<sup>[6]</sup>经过了近 20 年的技术革新,目前已经演化成集高精度、大尺寸和便携等特点于一体的柔性坐标测量系统,广泛应用于航空航天、汽车和光学制造<sup>[7]</sup>等领域,满足测量、装配、校准的需求。本文详细介绍了使用激光跟踪仪测量离轴非球面面形的原理、步骤及算法,并使用激光跟踪仪对一离轴抛物面镜进行了测量实验,进行了测量不确定度分析,并使用三坐标测量机(CMM)<sup>[8]</sup>对激光跟踪仪测

收稿日期: 2011-06-03; 收到修改稿日期: 2011-07-27

作者简介: 李 杰(1984—),男,博士研究生,主要从事光学精密测试技术方面的研究。

E-mail: newuser9919@sohu.com.cn

导师简介: 伍 凡(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造与测试技术等方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.ac.cn

量结果进行了验证。

## 2 测量原理

图 1 为激光跟踪仪系统测量原理图。激光跟踪仪实质上是一种基于球坐标原理的柔性空间坐标测量仪器。它使用内置的双频激光测距系统和高精度光电角度编码器测量仪器坐标原点到靶球(球形角锥反射镜,CCR)的空间距离及相应水平、垂直角度,计算靶球中心坐标;通过由位置探测器件(PSD)构成的反馈跟踪系统实现对靶球移动的跟踪,进行多点测量;根据被测对象的特征及所使用靶球的大小,对测量坐标点进行半径补偿及几何量偏差计算,从而完成检测任务。

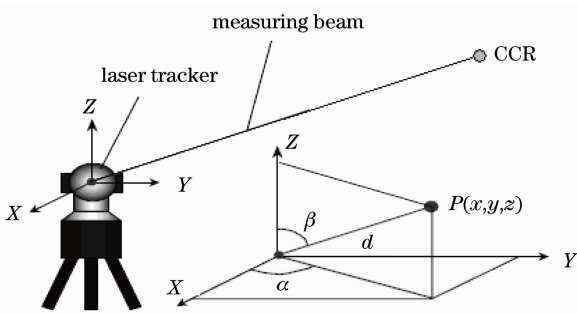


图 1 激光跟踪仪测量原理

Fig. 1 Measurement principle of laser tracker

## 3 检测步骤及数据处理

以下对激光跟踪仪测量离轴非球面镜的步骤及数据处理方法进行具体说明。

### 3.1 选择最佳测量位置

根据激光跟踪仪的测量原理,各种因素造成的误差对坐标测量带来的影响将体现在测距误差及测角误差中。跟踪仪采用双频激光干涉技术进行距离测量,以波长为单位计数,其测距精度优于测角精度。因此,合理设置激光跟踪仪相对被测镜面的位置可以有效减小测角误差对面形测量的影响<sup>[9]</sup>。对于理想球面,激光跟踪仪原点置于球心处,则跟踪仪原点至镜面的距离并不随角度变化而变化,因此,测角误差对面形的测量并没有影响。对于通常使用的离轴非球面,利用其接近球面的特点,也可以应用这一原理找到最佳测量位置。

以离轴抛物面为例,如图 2 所示,当激光跟踪仪处于离轴抛物面所对应完整抛物面光轴上不同高度处时,距离变化量与角度变化量所对应的关系为

$$\frac{dr}{d\theta} = r \sin \theta \left( 1 - \frac{1}{R} r \cos \theta \right) / \left( \frac{1}{R} r \sin \theta^2 + \cos \theta \right), \quad (1)$$

其中  $R$  为离轴抛物面所对应的完整抛物面的顶点曲率半径。 $h$  为激光跟踪仪在光轴上的高度,有

$$\theta = \text{atan} \frac{-x}{x^2/2R - h}, \quad r = \sqrt{x^2 + (x^2/2R - h)^2}.$$

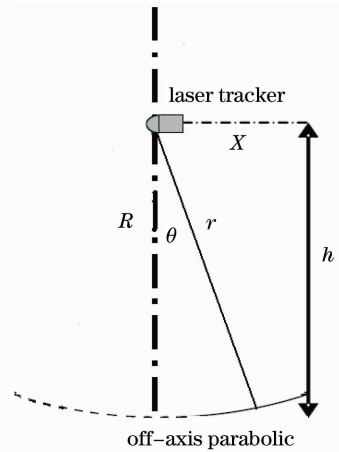


图 2 激光跟踪仪处于不同位置处,角度误差对测量面形的影响

Fig. 2 Angular accuracy influence of surface measurement in different laser tracker positions

由(1)式可计算得出:当激光跟踪仪置于离轴非球面顶点曲率半径附近,测角精度对面形测量精度的影响达到最小,对于非球面度较小的离轴非球面,测角精度的影响可以忽略不计。

### 3.2 建立测量坐标系

在测量开始时,先使用激光跟踪仪建立测量坐标系,测量坐标系的建立为测量点测头补偿及非球面拟合提供恰当的初始值。测量坐标系可以根据离轴非球面镜的形状特征,利用基准点或外圆及上、下端平面等特征要素建立。如图 3 所示,测量坐标系基本与离轴非球面所对应的完整非球面坐标系重合。

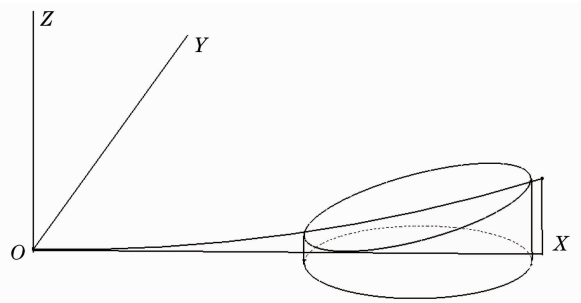


图 3 建立测量坐标系

Fig. 3 Establishing measurement coordinate system

### 3.3 镜面点测量

在测量坐标系下,对镜面点进行采集。测量点密度及分布依据所处加工阶段的面形情况而定。对

于离轴非球面,测量点应均匀分布在整個被测表面,避免像散等非对称像差的漏检。同时,整个测量过程应在稳定的环境中进行,减少由环境产生的测量误差。

### 3.4 数据处理

如图4所示,激光跟踪仪所测得的坐标点为靶球的中心位置坐标,欲得到靶球与镜面接触点的坐标,应先对测量坐标点进行半径补偿。

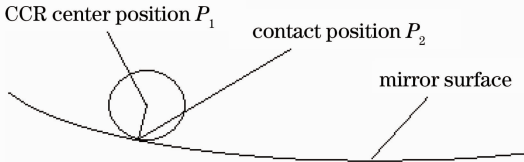


图4 半径补偿原理图

Fig. 4 Principle of radius compensation

半径补偿的原理为:依据测量点在非球面方程中的位置,对测量点坐标沿相应法线方向进行补偿,补偿后的坐标即为镜面点坐标,即

$$P_2 = P_1 + r \overrightarrow{P_1 P_2}. \quad (2)$$

由于激光跟踪仪测量的误差及镜子加工过程中存在的几何尺寸偏差,激光跟踪仪所建立的测量坐标系与测量点所对应的最佳拟合非球面坐标系往往存在微小倾斜及平移,如图5所示。因此,在测量坐标系下计算形位偏差并不能精确地表达镜面面形情况,需对测量所得镜面点坐标数据做进一步处理。

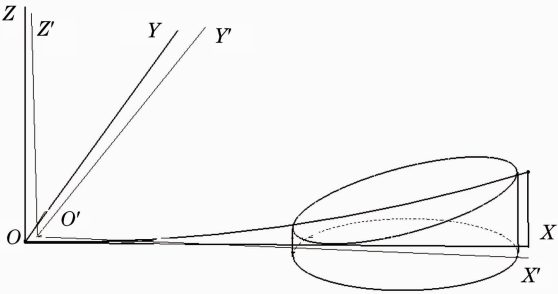


图5 坐标系偏差

Fig. 5 Coordinates deviation

对于一般二次离轴非球面,其所在旋转对称非球面的方程可表达为

$$z = f(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2(x^2 + y^2)}}, \quad (3)$$

式中  $k$  为偏心率,  $c = 1/R$ 。为了使测量坐标系下坐标点转换至最佳拟合非球面坐标系下,需对坐标系

在  $X, Y, Z$  方向上进行  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  的平移,同时绕  $X, Y$  轴旋转  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  (考虑完整非球面关于  $Z$  轴的旋转对称性,不进行  $Z$  轴旋转)。则测量点坐标在两个坐标系下的对应关系为

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\alpha & -\sin \Delta\alpha \\ 0 & -\sin \Delta\alpha & \cos \Delta\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Delta\beta & 0 & \sin \Delta\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta\beta & 0 & \cos \Delta\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中  $x_a, y_a, z_a$  为测量点在理想非球面下的坐标,同时参数  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta$  应使目标函数  $F$  值最小:

$$F(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta) = \sum [z_{ai} - f(x_{ai}, y_{ai})]^2. \quad (5)$$

由此转换成多参数无约束非线性的优化问题,可使用 Matlab 优化工具箱中的优化函数求解<sup>[10,11]</sup>。求解后,进行坐标变换即可得出测量点在最佳拟合非球面坐标系下的坐标,通过与理论坐标值比较即可得出面形偏差。

## 4 误差分析及实验结果

使用 Faro ION 型激光跟踪仪对一口径 150 mm,顶点曲率半径 1200 mm,离轴量 240 mm 处于研磨阶段的离轴抛物面镜进行了测量实验。测量时激光跟踪仪置于离轴抛物面镜顶点曲率半径处。以下给出测量不确定度分析及跟踪仪的测量结果,同时给出了三坐标机测量该离轴镜的结果。

### 4.1 不确定度分析

使用激光跟踪仪测量离轴镜的不确定度来源主要为跟踪仪系统误差及环境引起的测量误差。

跟踪仪系统误差主要包括跟踪仪几何轴系误差、角锥棱镜制造误差、测长系统误差及测角系统误差等,使用解析的方法分别标定这些误差对面形的测量影响是复杂且不易实现的。在测量前,使用一口径 140 mm,曲率半径 200 mm 的标准球面镜对由以上因素带来的面形测量误差进行多次测量,从而标定得出由跟踪仪系统误差产生的测量不确定度分量  $u_1 = 0.85 \mu\text{m}$ 。

由环境因素引起的测量误差主要体现为:温度等气候条件变化导致空气折射率变化而产生的长度计数误差、温度变化而导致热胀冷缩产生跟踪仪相对于被测镜的位移。在测量前,使用跟踪仪对测量时间内的路径长度变化量进行了多次静态测量,标

定得出由环境因素引起的测量不确定度分量为 $u_2 = 1.23 \mu\text{m}$ 。

有公式如下：

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}. \quad (6)$$

根据(6)式对测量不确定度分量进行合成,则激光跟踪仪测量此离轴镜的标准测量不确定度为 $U = 1.50 \mu\text{m}$ 。

#### 4.2 实验结果

图6所示为激光跟踪仪测量结果,图中PV表示峰谷值,RMS表示均方根值。

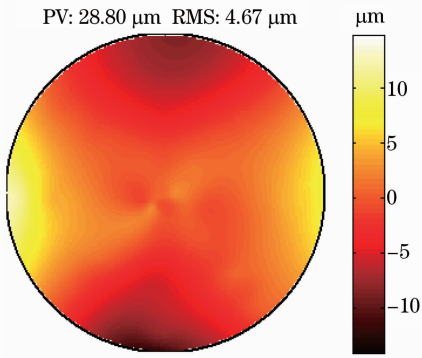


图6 激光跟踪仪测量结果

Fig. 6 Laser tracker measurement result

按照激光跟踪仪测量点分布,使用三坐标测量机进行了对比测量,测量结果如图7所示。

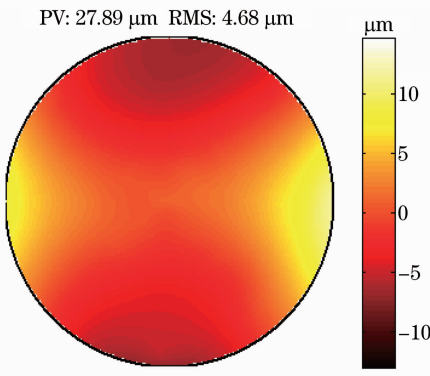


图7 三坐标机测量结果

Fig. 7 CMM measurement result

激光跟踪仪与三坐标测量结果的PV值及RMS值如表1所示。可见激光跟踪仪与三坐标机测量值的PV值的一致性优于 $1 \mu\text{m}$ ,符合不确定度分析的结果,在图形上,面形误差也趋于一致,验证了激光跟踪仪测量离轴非球面镜面形方法的准确性。

表1 激光跟踪仪与三坐标机测量结果

Table 1 Measurement results of laser tracker and CMM

Measurement instrument	PV / $\mu\text{m}$	RMS / $\mu\text{m}$
Laser tracker	28.80	4.67
CMM	27.87	4.68

## 5 结 论

详细介绍了使用激光跟踪仪测量离轴非球面镜面形的原理及步骤,并对一处于研磨阶段的离轴抛物面镜进行了检测。测量不确定分析结果及与三坐标机对比测量结果表明,基于激光跟踪仪的测试方法能够满足离轴镜面抛光前的检测需求。与传统的三坐标、轮廓仪测量方法相比,尽管手动测量方式增加了检测任务的劳动量,但提高了测量点分布的灵活性且不用针对测量点进行编程操作。在具备良好检测环境或环境补偿的前提下,激光跟踪仪可以实现在位测量且具有更大的测量范围,因此在大口径光学件面形的检测方面具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- Xie Feng, Hao Qun, Zhu Qidong. Best-fit spheric surface definition based on slope asphericity for aspheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3197~3202
- 谢枫,郝群,朱秋东. 基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3197~3202
- Yang Li. *Advanced Optical Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001
- 杨力. *先进光学制造技术*[M]. 北京:科学出版社, 2001
- Zhao Xing, Song Lipai, Kong Qiang et al. Resolving of the best-fit sphere and the material removal in off-axis asphere fabrications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 61~64
- 赵星,宋丽培,孔强等. 离轴非球面加工中最接近球面及研磨去除量的求解[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 61~64
- Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
- 朱勇建,潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011202
- Zheng Ligong, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Computer aided alignment for off-axis asphere null test [C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 319~323
- Li Guangyun. The principle and application of LTD500 laser tracker system [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, **10**(4): 3~8
- 李广云. LTD500激光跟踪测量系统原理及应用[J]. *测绘工程*, 2001, **10**(4): 3~8
- B. B. Gallagher. *Optical Shop Applications for Laser Tracker Metrology Systems*[D]. Tucson: University of Arizona, 2003
- Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, Feng Xuyong et al. 3D coordinate laser non-contact measuring system and error control methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 129~133
- 张爱武,胡少兴,冯绪勇等. 三坐标激光非接触外形尺寸快速测量系统与误差控制方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 129~133
- Zhang Xi, Chen Wuyi. The contour measurement uncertainty in the measurement of curve surfaces with a laser tracker[J]. *Acta*

Metrologica Sinica, 2006, **27**(2): 107~112

张 曦, 陈五一. 激光跟踪仪测量曲面的测量不确定度研究[J]. 计量学报, 2006, **27**(2): 107~112

- 10 Zhou Yang, Li Xinnan. Research of calculate second order off-axis aspheric parameter [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2008, **21**(3): 357~361

周 洋, 李新南. 离轴二次曲面面型参数测量归算方法的研究

[J]. 天文研究与技术, 2008, **21**(3): 357~361

- 11 Zhao Ruian, Wu Fang. Theory and Methods for Monlinear Optimization [M]. Hangzhou: Zhejiang Publishing House of Science and Technology, 1991

赵瑞安, 吴 方. 非线性最优化理论和方法[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 1991

栏目编辑: 谢 婧