

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0128-03

# 非球面镜顶点曲率半径测量方法

王浩, 李莹, 曾理江, 冯之敬

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 非球面镜具有优良的光学性能,在现代光学系统设计中广泛采用。在非球面镜的生产加工中,需要一种既方便快捷又准确可靠的测量一些特征参数的在线检测方法。顶点曲率半径是非球面镜加工、检测和光学系统装校中的一个重要参数。介绍了一种基于光线追迹原理的非球面镜顶点曲率半径的测量方法和一些实验结果。

**关键词** 精密工程测量; 非球面镜; 顶点曲率半径; 光线追迹; 在线检测

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

## A New Method on Measuring Radius of Curvature of an Aspherical Mirror

WANG Hao, LI Ying, ZENG Li-jiang, FENG Zhi-jing

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** It is important to find an efficient method for aspherical parameters on line measuring. Radius of curvature is an important parameter in machining and measuring aspherical mirrors and in optical alignment. A new method on measuring radius of curvature based on the principle of ray tracing is proposed, and some experiment results are discussed.

**Key words** precision engineering measurement; aspherical mirror; radius of curvature; ray tracing; online measuring

### 1 引言

非球面元件能有效地消除像差,提高光学系统的成像质量,同时可以减少光学系统的重量,提高稳定性,降低成本,在空间光学系统、军用光学系统、天文和高科技民用产品中得到广泛的应用。但长期以来由于非球面元件在制造和检测方面的高难度,使传统的手工加工方式已经不能满足科技发展的要求。美国的 Arizona 大学和 Rochester 大学首先开展了计算机控制光学表面成形 CCOS(Computer Controlled Optical Surfacing)技术的研究工作。应用光学国家重点实验室在大型非球面主镜的实际加工实践中,形成了有关非球面不同加工阶段的面形误差的评价方法和工艺技术规范,中国科学院长春光学精密机械与物理所研究开发了一套计算机控制光学非球面制造系统。实现非球面数控加

工的关键,在于检测技术方法的准确与完善。非球面镜面形测量主要分为直接测量法和光波面测量法,前者属于接触测量,可以直接得到曲率半径,但速度慢且容易划伤表面;后者基于光波面补偿的干涉测量法<sup>[1]</sup>,应用广泛,面形测量精度较高,对顶点曲率半径的测量主要是基于面形数据,用曲线拟合的方法计算得到,因此面形测量的微小误差会导致较大的顶点曲率半径误差,特别是当曲率半径较大时,该误差比较严重,另外测量系统较复杂,难以实现加工过程中的在线测量。

光线追迹法是光学设计的重要手段,在光学器件的检测中也有着广泛的应用<sup>[2,3]</sup>。本研究方案提出了一种类似光学设计中光线追迹的测量方法。激光以点阵结构光形式入射到被测非球面镜上,通过 CCD 摄像机分别测量光点在接收屏上的位置,通过

**基金项目:** 清华大学博士生科研创新基金、国家自然科学基金(50175062)、国家 863 高技术研究发展计划(2001AA421140)资助课题。

**作者简介:** 王浩(1976-),男,安徽人,清华大学精密仪器系研究生,主要从事昆虫飞行机理研究。

E-mail: whao98@mails.tsinghua.edu.cn

对输入及输出图像的分析处理直接得到顶点曲率半径。测量中利用了成像光路中的多个过渡平面，使测量精度有较大提高。此方法不仅可以用于测量非球面镜的顶点曲率半径，而且有望实现加工在线测量。此研究对解决非球面镜加工中的在线测量问题和指导光学系统的总体装调是十分有意义的。

## 2 测量原理

### 2.1 非球面法线汇与顶点曲率半径

大多数光学系统中所采用的非球面为旋转二次曲面，在研究其性质时，给出其子午曲线方程就足够了。图1显示了当非球面顶点为坐标原点  $O'$ ，旋转对称轴为  $O'-X'$  时，非球面  $A$  与其顶点球面  $F$  的关系示意图。此时，二次曲面空间方程符合以下形式

$$y'^2+z'^2=2Rx'-(1-e^2)x'^2 \quad (1)$$

其中， $R$  为顶点曲率半径， $e$  为偏心率，它们反映了非球面的形状特征。在图1中， $C_0$  为非球面顶点曲率中心， $|O'C_0|$  即为顶点曲率半径  $R$ 。 $C_1$  和  $C_N$  分别为非球面上点  $Q_1$  和  $Q_N$  的法线与光轴的交点。考虑到非球面的旋转对称性，在光轴上交于一点的非球面的法线将构成一个圆锥面。由于非球面的法线汇是非共心光束，其与光轴交于不同点，且构成不同的角度，并且在一定程度内有  $\angle O'C_1Q_1 < \angle O'C_NQ_N$ ，即随着非球面上点远离顶点，其对应的法线与光轴的夹角在随着增大。设有空间一点  $M'$  满足到法线汇各法线的距离之和最小，考虑到法线相对于光轴旋转对称，以及法线与光轴夹角的关系，可以证明，点即为光轴上点  $C_N$ 。 $M'$  的纵向法线像差为

$$\delta_{M'} = |C_0C_N| = e^2x'_{Q_s} \quad (2)$$

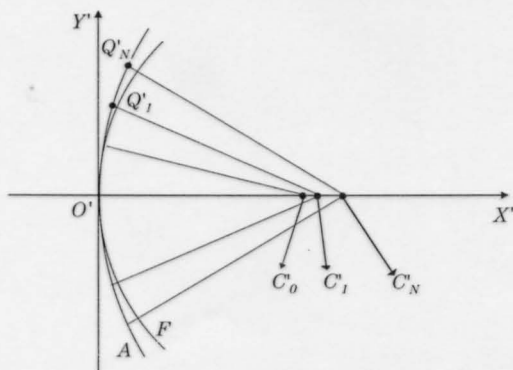


图1 非球面法线汇与顶点曲率中心的关系

Fig.1 The relationship of normal lines and center of curvature of an aspherical surface

### 2.2 非球面空间方程与非球面顶点

有别于图1中的坐标系，二次曲面在笛卡儿空

间的一般表达式为

$$ax^2+by^2+cz^2+2fyz+2gzx+2hxy+2px+2qy+2rz+d=0 \quad (3)$$

如果能够测得非球面上10个以上型值点的空间坐标，就可以依照最小二乘法的原则拟合出该非球面的空间方程。进一步依照下列方程组求得该非球面的顶点坐标  $V$ 。

$$\begin{cases} ax+hy+gz+p=0 \\ hx+by+fz+q=0 \\ gx+fy+cz+r=0 \end{cases} \quad (4)$$

## 3 测量系统

图2为非球面镜顶点曲率半径测量系统。激光器和光栅阵列用于产生  $N \times N$  的点阵结构光，其完全入射到待测非球面镜，并且被反射。1#接收屏安装在精密步进工作台上，它垂直于工作台丝杆，用于接收入射光线。接收屏在不同位置时，其面上的  $N \times N$  入射光斑由1#CCD采样记录，并存储在计算机中。同样，2#接收屏和2#CCD用来接收和采样不同位置的  $N \times N$  反射光斑。

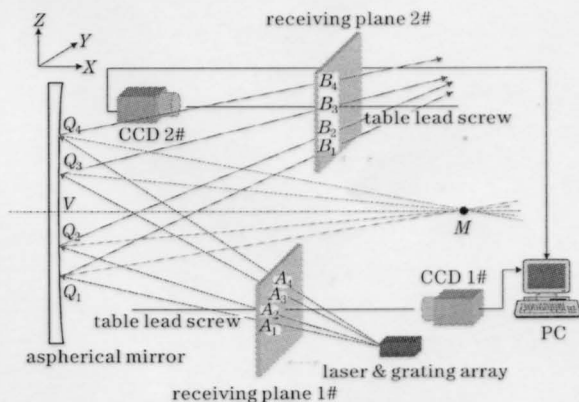


图2 非球面顶点曲率半径测量系统

Fig.2 The measuring system for radius of curvature of an aspherical mirror

由于空间两点确定一条直线，所以入射光线和反射光线的空间直线方程可以分别由位于不同位置的入射光斑对和反射光斑对确定。根据光线传播的反射定律可以知道，入射光线与其对应反射光线的交点为反射面上的一个型值点；该点的法线即为入射光线和反射光线的角平分线。由此，可以在非球面镜上得到  $N \times N$  的型值点，按照式(3)和(4)可以得到该非球面镜顶点的坐标  $V$ ；同时，还可以得到  $N \times N$  的法线汇，用优化算法可以得到与法线汇距离之和最短的空间点坐标  $M$ 。以  $V$  和  $M$  确定的直线作为该非球面镜的光轴，进行空间坐标变换，得到非球面符合

式(1)形式的表达式,以及 $|O'M'|$ 。最后用式(2)结合非球面上边缘型值点( $x_0$ 相对最大)对 $|O'M'|$ 修正,即可得到该非球面镜的顶点曲率半径  $R$ 。

基于该方法,我们用  $4 \times 4$  的点阵结构光对顶点曲率半径为 1300.0 mm 的抛物面进行测量,平均测量误差优于 0.3%。

### 4 结论

(1) 基于光线追迹法直接测量非球面镜顶点曲率半径的方法具有快速简便的优点,可以准确地测量出顶点曲率半径这一非球面镜的重要参数,并且为

非球面镜的在线加工检测提供了一种简便可行的方法。

### 参考文献

- 1 R. Diazuribe, M. Camposgarcia. Null-screen testing of fast convex aspheric surface[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(16), 2670-2677
- 2 Z. Feng, H. Wu, Z. Guo *et al.*. Fabrication of a free-form lens with computer-controlled optical surfacing [C]. *Proc. SPIE*, 2000, 4231-43:194-201
- 3 A. Jesus, Q. Manuel. Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, 3:387-397



(1) 
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{x_0} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{y_0}{x_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y_0'}{x_0} \right)^2 \right]$$

丁和及... 非球面... 光线追迹法... 测量非球面镜的顶点曲率半径... 该方法... 快速简便... 准确... 测量出顶点曲率半径... 这一非球面镜的重要参数... 并且为... 非球面镜的在线加工检测提供了一种简便可行的方法。

(2) 
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{x_0} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{y_0}{x_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y_0'}{x_0} \right)^2 \right]$$

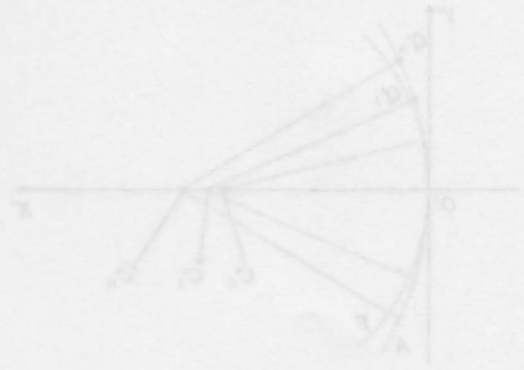


图1 非球面镜的顶点曲率半径与测量点位置的关系

The relationship of vertex radius and center value technique on to aspherical surface

非球面镜的顶点曲率半径与测量点位置的关系