

基于相位测量偏折术的非球面法线向量测量

赵文川¹ 范斌¹ 伍凡¹ 苏显渝² 陈文静²

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(² 四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065)

摘要 非球面可以由其法线汇来表征,即可以由法线距和法线角的关系来描述。提出了一种基于相位测量偏折术(PMD)的非球面反射镜法线向量检测方法。在PMD测量系统中,将待测镜沿光轴方向作相对移动。在移动过程中,由CCD相机扫描待测镜,观察并记录下随待测镜移动而发生变化的条纹图,通过相位分布计算得到非球面法线距和法线角的关系,即非球面的法线汇,再由法线汇计算得到非球面面形直角坐标分布。在该方法中,可以用法线汇来描述非球面的面形,同时也可以通过几何计算转换到直角坐标系进行评价。

关键词 光学测量;非球面法线;相位测量偏折术;条纹分析

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0612007

Testing of Aspheric Surface Normal Vector Based on Phase Measuring Deflectometry

Zhao Wenchuan¹ Fan Bin¹ Wu Fan¹ Su Xianyu² Chen Wenjing²

¹ Institute of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

² Opto-Electronics Department, School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract The aspheric normal intersects the optical axis at different points with different angles and the surface can be expressed by the normal. The method based on phase measuring deflectometry (PMD) for testing the surface normal is presented. The aspheric surface under test shifts accurately along the optical axis relative to the measurement system. The camera observes the patterns reflected off the testing mirror at every scanning position while scanning the testing aspheric surface along the optical axis. Through the phase distributions, the relation between the intersection point and the angle of the surface normal with the optical axis can be gotten. In this method, the surface can also be expressed in the orthogonal coordinate.

Key words optical measurement; aspheric surface normal; phase-measurement deflectometry; fringe analysis

OCIS codes 120.5050; 080.0080; 040.1520; 100.4999; 100.5100

1 引 言

非球面光学零件能够校正像差、改善像质、扩大视场,并使光学系统结构简化、重量减轻。随着光电学的发展,非球面越来越广泛地应用于各种光学系统中^[1]。目前通常采用的干涉计量技术,其精度很高,可以达到几十分之一波长。但其测量动态范围很小,在测量非球面时,一般都需要制造辅助元件。同时,在细磨过程中,由于其面形误差较大,也不适合用干涉计量等高精度的手段进行测量。三维

坐标测量仪可以用来进行检测,但是用测头对被测面进行接触式单点测量,非常费事、费时^[2~4]。

结构光计量方法获取的信息量丰富,具有快速全场测量、测量精度较高、设备成本相对较低等优点,已被广泛地应用于三维测量领域中^[5]。针对光学反射表面和透明物体波前,提出了一种相位测量偏折术(PMD)的方法来进行测量^[6,7]。其特点是根据光线的偏折来确定待测物体的三维信息,利用光线的反射定律记录待测物体对标准条纹的镜像,根据镜像条纹的

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 赵文川(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事光学检测和信息光学等方面的研究。

E-mail: zhaowc168-98@163.com

相位变化量计算镜面物体三维面形。近来,唐燕等^[8~11]都在这方面进行了一些研究和实验,在不同条件下实现了对非球面的测量。本文讨论基于 PMD 的非球面反射镜法线向量测量,将待测镜相对于测量系统作相对移动,CCD 相机通过待测镜观察条纹图,并拍摄变形条纹图,根据条纹图的相位分布得到待测镜面形法线距与法线角的关系,从而对面形进行评价,也可以根据测量系统的几何关系通过计算转换到直角坐标系进行评价。实验表明了这一技术的可行性。

2 基本原理

事实上,任何一种非球面都具有法线汇,其法线与光轴交于不同点并构成不同角度,如图 1 所示。非球面不仅仅可以用它的直角坐标系方程来表征,也可以用纵向法线像差和法线与光轴的夹角来表征^[4]。为了方便说明,将非球面顶点和非球面法线与光轴的交点之间距离称为法线距,用 p 来表示;将非球面法线对于光轴的倾角称为法线角,用 u 来表示。显然,非球面面形还可以用法线汇的性质,即法线距 p 与法线角 u 的关系: $p = g(u)$ 来表征。

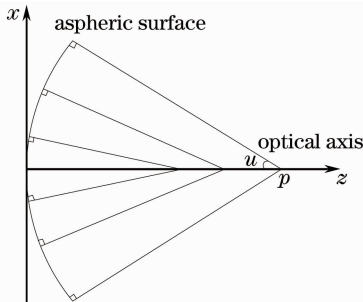


图 1 非球面的法线汇示意图

Fig. 1 Schematic of aspheric-surface normal convergence

实验装置如图 2 所示,系统由电子器件[包括液晶显示器(LCD)、CCD 相机、电控平移台]和一个半透半反镜组成,电子器件都由一个计算机控制。CCD 相机的光心置于待测镜的光轴上。LCD 显示由计算机产生的环形正弦条纹图,其显示平面垂直于待测镜光轴。待测镜固定在电控平移台上,可以在计算机的控制下沿光轴精确移动,其表面具有镜面反射特性。LCD 上显示的环形正弦条纹图,经半透半反镜透射后,再被待测镜和半透半反镜反射后为 CCD 相机所接收;也就是 CCD 相机通过待测反射镜来观察 LCD 显示屏,可以拍摄到显示屏上显示的图像即环形正弦条纹图。测量过程中,光线的实际传播方向是从 LCD 发出,经被测镜反射后进入到 CCD 相机。而在 PMD 测量方法中,为方便讨论,都

是以 CCD 相机为出发点来进行计算^[6~8],所以本文中光线方向反向,假设光线是从 CCD 相机出发,经被测镜反射后入射到 LCD 显示屏上。由于携带了待测镜的面形信息,所以 CCD 记录的条纹图会发生变形,变形量取决于镜面的面形。在测量过程中,电控平移台控制待测镜在光轴方向上精确移动,而 CCD 相机、半透半反镜和 LCD 的位置都保持不变。当沿光轴方向移动待测镜,而相机位置保持不变时,两者的相对位置发生了变化,所以相机的成像率会发生改变,观察到的显示屏上的区域也会改变。在不同的位置,相机的像素单元会从待测镜上的不同点反射,到达显示屏上的不同位置,并记录下不同的相位。

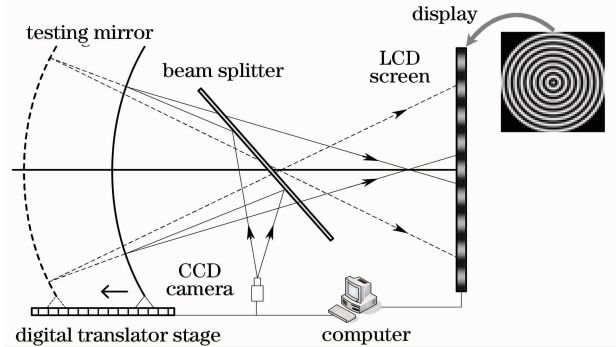


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

测量原理如图 3 所示,CCD 相机采用理想的针孔模型,像点、光心和物点都在一条直线上, O 为光心。考虑相机对应光线与光轴的夹角,即相机像素点和光心连线与光轴的夹角,显然每个像素都对应了一定角度的光线。考虑某一像素单元 k , 设其对应光线的夹角是 u_k 。在测量过程中, PMD 系统位置保持不变,将待测镜沿光轴方向精确移动,设与 CCD 相机光心 O 的距离分别为 p_0, p_1, \dots, p_n 。在待测镜从 p_0 连续移动到 p_n 的过程中,光线会被待测镜上的不同点 S_0, S_1, \dots, S_n 反射,并与条纹屏相交于不同点。由于移动过程中,环形条纹的周期是不变的,而反射

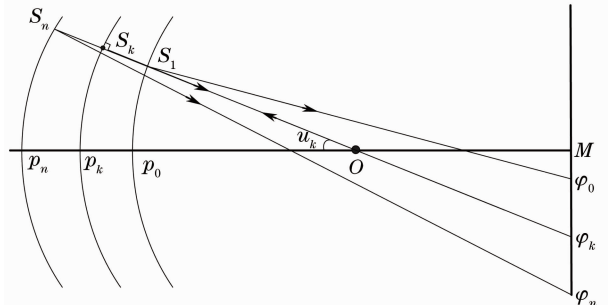


图 3 测量原理示意图

Fig. 3 Schematic of the measurement principle

光线与显示屏的相交点逐渐远离光轴,所以在不同位置得到的相位值是不一样的,其绝对值趋势是单调增加的。在每个位置 p 处,分别使用条纹相移技术和截断相位展开方法,可以得到所对应的不同相位值 $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n$ ^[5,12]。当待测镜处于一个特殊位置 p_k 时,也就是 $p = p_k$,像素 k 对应的原始光线在待测镜 S_k 处反射成为偏折光线并原路返回。根据反射定律,此时待测镜在 S_k 点的法线与原始光线、偏折光线重合,即 S_kO 就是待测镜面形 S_k 点处的法线。

从图 3 中的几何关系可以得到,在位置 p_k 处,像素 k 测量得到的相位值 Φ_k 可表示为

$$\Phi_k = 2\pi(\tan u_k l_{OM})/T, \quad (1)$$

式中 T 为显示屏显示环形正弦条纹的周期; l_{OM} 为光心 O 与显示屏的距离; Φ_k 称为标准参考相位值。根据待测镜在不同位置像素单元 k 记录的条纹相位信息和测量系统的参数,就可以计算得到位置 p_k 。这样,就得到了待测镜面面形在 S_k 点处的法线距 p_k 和法线角 u_k 的关系,决定了待测镜面面形的法线汇,也就描述了待测镜面的面形。 S_k 点称为是法线角 u_k 的匹配点。

下面讨论计算方法,待测镜的位置可以表示为向量 \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = [p_0, p_1, \dots, p_n]. \quad (2)$$

像素单元 k 在待测镜处于不同位置 \mathbf{P} 时得到的相位值可以表示为向量 $\boldsymbol{\varphi}$:

$$\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n]. \quad (3)$$

通过多项式拟合, \mathbf{P} 和 $\boldsymbol{\varphi}$ 的关系可以用函数 F 表示为

$$\mathbf{P} = F(\boldsymbol{\varphi}). \quad (4)$$

由(1)式求出角度 u_k 对应的标准参考相位值 Φ_k 并代入上式,就可以得到 p_k 。这表示待测镜面面形在 S_k 点处的法线距 p_k ,法线角为 u_k 。

实际测量中,待测镜面面形法线与光轴的夹角有一个最大值,其对应的匹配点在待测镜面的边缘。如图 4 所示,对待测镜的边缘点 A ,设其法线交点距离为 p_k ,角度为 u_k 。当待测镜位置 $p > p_k$ 时,角度 u_k 的光线不能被待测镜反射,对应的像素数据为空,对测量没有贡献,如图中虚线所示。所以只需要处理角度满足 $0 \leq u_k \leq u_k$ 的像素,就可以完全描述待测镜面面形的法线汇。下面介绍计算得到这个最大角度 u_k 的方法。如图 5 所示,当待测镜位于 $\mathbf{P} = [p_0, p_1, \dots, p_n]$ 时,不同的像素点会探测到边缘点 A ,设这些像素点对应的原始光线夹角以向量表示为 $\mathbf{u}_A([u_0, u_1, \dots, u_n])$,反射后偏折光线到达显示屏后,记录的相位以

向量表示为 $\boldsymbol{\varphi}_A([\varphi_{A0}, \varphi_{A1}, \dots, \varphi_{An}])$ 。通过多项式拟合, \mathbf{u}_A 和 $\boldsymbol{\varphi}_A$ 的关系可以用函数 H 表示为

$$\mathbf{u}_A = H(\boldsymbol{\varphi}_A). \quad (5)$$

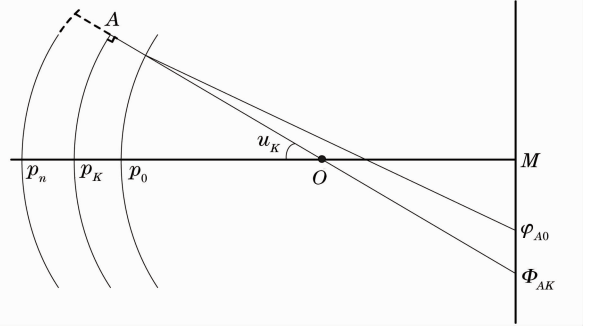


图 4 边缘点的反射光线

Fig. 4 Reflected ray on the edge

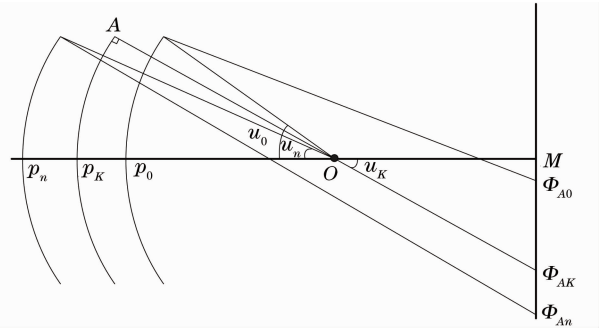


图 5 边缘点的法线向量测量

Fig. 5 Normal-vector test on the edge

同时,根据系统的结构和参数, u_k 和 φ_{AK} 还应该满足方程

$$\varphi_{AK} = 2\pi(\tan u_k l_{OM}). \quad (6)$$

联立(5),(6)式求解,就得到了 u_k 和 φ_{AK} 。然后,对所有原始光线角度满足 $0 \leq u_k \leq u_k$ 的 $\mathbf{u}([u_0, \dots, u_k, \dots, u_k])$ 像素都进行计算,得到对应的法线距 $\mathbf{p}([p_0, \dots, p_k, \dots, p_k])$ 。这里是用离散数据来表示的,将法线角和法线距的关系用多项式拟合,可以表示为连续函数 G

$$\mathbf{p} = G(\mathbf{u}), \quad (7)$$

函数 G 表示了待测镜面的法线汇,也描述了待测镜的面形。由离散数据量,包括角度 $\mathbf{u}([u_0, \dots, u_k, \dots, u_k])$ 和交点 $\mathbf{p}([p_0, \dots, p_k, \dots, p_k])$,也可以恢复重建待测镜的面形。

3 由非球面法线恢复面形的几何计算方法

如图 6 所示,设 S 为待测镜面形,向量 $\mathbf{S}([S_0, \dots, S_{k-1}, S_k, \dots, S_K])$ 表示法线角 $\mathbf{u}([u_0, \dots, u_{k-1}, u_k, \dots,$

u_k])的匹配点,对应的法线距为 p ($p_0, \dots, p_{k-1}, p_k, \dots, p_K$).当角度 u 趋近于 0 时,函数 G 的值 L_0 就是待测镜面的顶点球曲率半径

$$L_0 = \lim_{u \rightarrow 0} G(u), \quad 0 \leq u \leq u_K. \quad (8)$$

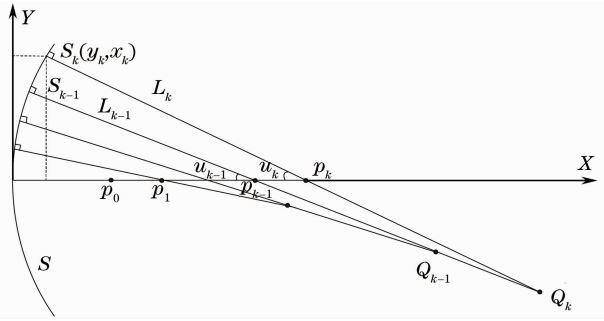


图 6 由非球面法线恢复面形

Fig. 6 Surface reconstruction from the normal of the aspheric surface

不失一般性,设 Q_k 是待测镜面相邻法线 $S_{k-1}Q_{k-1}$ 和 S_kQ_k 的交点.由于 p_k 与 p_{k-1} 的差值很小,法线 $S_{k-1}Q_{k-1}$ 和 S_kQ_k 非常接近,所以点 S_{k-1} 和 S_k 可以看成是处在同一个圆弧上,这个圆的中心是 Q_k 点,所以根据半径相等有如下近似关系:

$$Q_k S_k \approx Q_k S_{k-1}. \quad (9)$$

设点 S_k 到交点 p_k 的距离为 L_k ,即 $S_k P_k = L_k$,则上式可表示为

$$L_k + p_k Q_k \approx L_{k-1} + p_{k-1} Q_k. \quad (10)$$

在 $\triangle p_k p_{k-1} Q_k$ 中,根据三角正弦定理可得

$$\frac{\sin(u_k - u_{k-1})}{p_k - p_{k-1}} = \frac{\sin u_{k-1}}{p_k Q_k} = \frac{\sin(\pi - u_k)}{p_{k-1} Q_k}. \quad (11)$$

联立(10),(11)式, L_k 可以表示为

$$L_k = L_{k-1} + \frac{\sin(\pi - u_k)}{\sin(u_k - u_{k-1})} (p_k - p_{k-1}) - \frac{\sin u_{k-1}}{\sin(u_k - u_{k-1})} (p_k - p_{k-1}). \quad (12)$$

以直角坐标系形式表示的面形数据点 $S_k(y_k, x_k)$ 表示为

$$\begin{cases} x_k = p_k - L_k \cos u_k \\ y_k = L_k \sin u_k \end{cases}. \quad (13)$$

这样就重建恢复得到了待测镜面形分布.该测量方法中 CCD 相机是基于针孔模型,所以仅适合测量小孔径非球面镜.若测量大孔径非球面镜,CCD 相机不能近似为针孔模型时,要实现高精度的测量,需要进行相机标定和系统标定.相机标定和系统标定的精度会直接影响到最终的测量精度,这时在实践上会有一定的困难,需要进一步研究.

4 实验结果

实验中,用 LCD 作为显示屏,并固定在电控平移台上,显示屏分辨率为 1280 pixel \times 1024 pixel,刷新频率为 60 Hz,像素间隔为 0.2640 mm,正弦环形条纹图样周期为 16 pixel,即 $T=4.23$ mm,相位分布为标准的圆锥形,灰度等级为 256.采用四步相移法求解相位分布.被测镜是口径为 46 mm 的凹面反射镜.相机光心 O 与条纹显示屏的距离为 $l_{OM}=410$ mm.被测镜先被置于距离相机光心 175 mm 的地方,经过 4 次移动到了距离光心 195 mm 的位置,移动步长为 5 mm.在每一位置处,相机记录的条纹图如

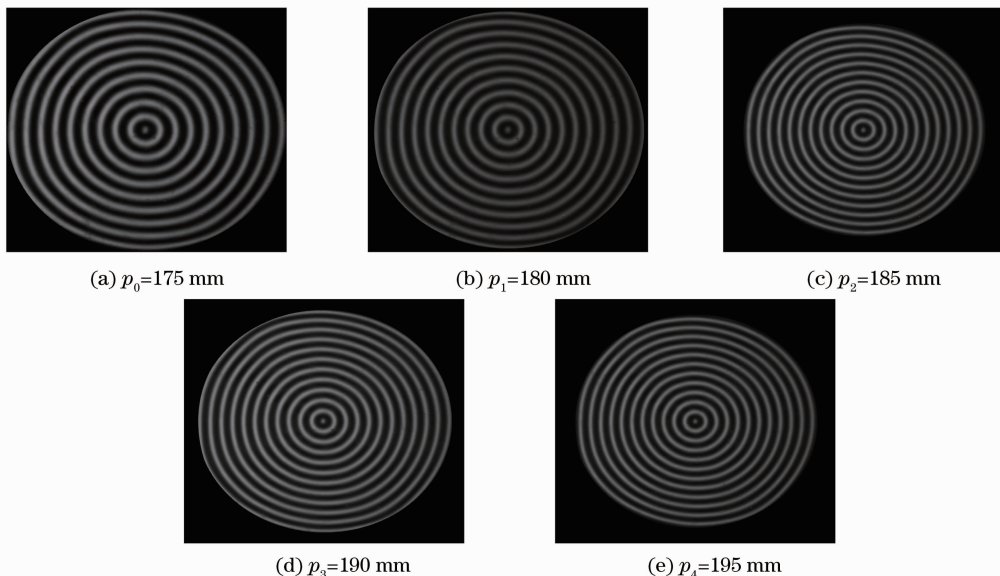


图 7 各个位置相机记录的条纹图

Fig. 7 Recorded fringe patterns at different positions

图7所示。图8为某一角度从中心到边缘的径向上,法线距与法线角的关系示意图。从图中可以看出,被测镜的中心曲率约为 $p_0 = 193.5$ mm。为获得更精确的结果,可以将被测镜的位置在 183 mm 和 195 mm 之间移动,同时减小步长,增加移动次数。用本文所述方法测量得到的面形分布如图9所示,图10为用三维坐标测量仪测量的结果。两者在 x 和 y 两垂直方向上中心行的差值如图11所示,偏差在 10^{-3} mm 量级。

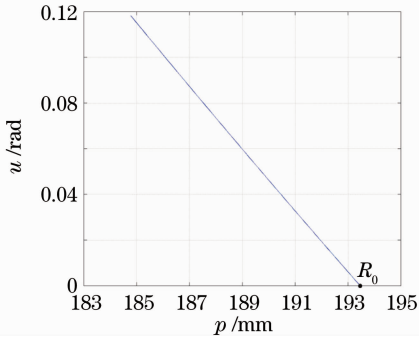


图8 被测镜面径向上的法线距 p 与法线角 u 的关系
Fig. 8 Relation between p and u of the tested mirror

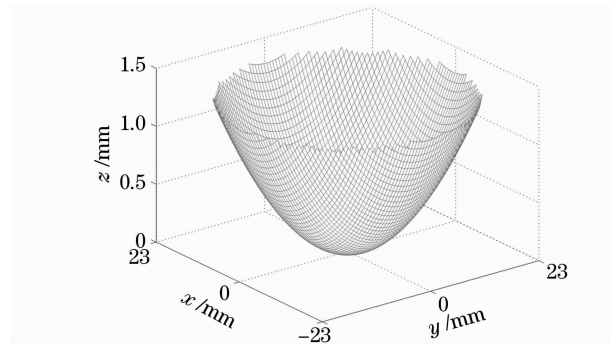


图9 重建面形分布

Fig. 9 Reconstructed surface distribution

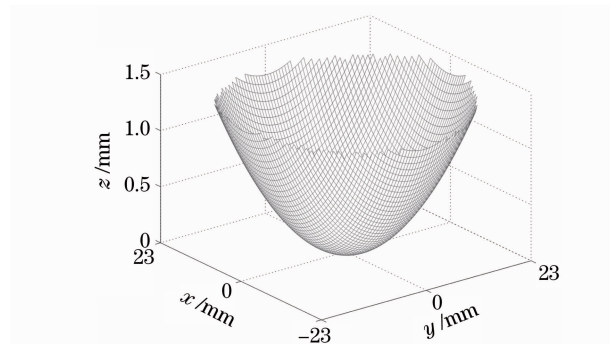


图10 三维坐标测量仪测量结果

Fig. 10 Results using the 3D-coordinate measurement machine

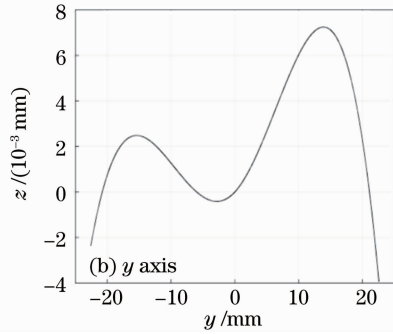
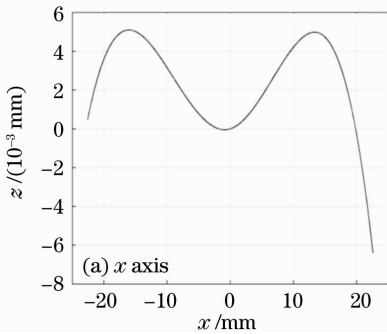


图11 两种方法测量结果在两垂直方向上中心行的差值

Fig. 11 Differences along the central cross section between the two measurement values by two methods

5 结 论

讨论了基于相位偏折术的非球面法线向量检测方法。该方法可以用非球面的法线汇,即法线距与法线角的关系,来描述非球面的面形,更清楚地表述了所提方法的原理和测量过程,也使计算公式和计算过程更加简洁,同时也可以转换到直角坐标系进行评价。对于补偿法来说,利用非球面的这种表示法恰恰是方便的,因为补偿器的计算以及在干涉仪上测量结果的处理,要用到所有常用的几何光学概念和像差理论。在用补偿法检测非球面时,需要设计折射或反射补偿系统,这时往往将非球面法线看

作光线,需要先计算出法线与光轴的交点位置及角度。该方法比干涉计量具有更大的测量范围,与三维坐标测量仪相比,可以一次完成全场测量,更方便、快捷、省时,具有结构简单、成本低、灵活性高的特点。从实验结果对比中可以看出中心测量精度比其它地方高,其原因主要有:1)实验中 CCD 相机采用的是针孔模型,在这个近似条件下,中心处的误差要比其它地方小;2)在由法线距与法线角的关系转换到直角坐标系描述面形分布时,误差会从中心向其它地方累积和扩散。本文所提的方法,可通过严格的相机标定、系统标定校准和采用更高精度的位

移装置减小系统测量误差来提高精度,可为加工过程中波前变化范围较大的非球面反射镜精磨和初抛光阶段的检验提供一种可选择的方法。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua. The Design, Manufacture, Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Beijing: Science Press, 2004
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- 2 Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Metrology [M]. Beijing: Science Press, 1998
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 Pan Junhua. The guiding idea in optical inspection[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(6): 1~3
潘君骅. 谈谈光学检测的指导思想[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(6): 1~3
- 4 D. T. Luraev. Optical Aspheric Testing[M]. Yang Li Transl. Beijing: Science Press, 1982. 9~19
普里亚耶夫. 光学非球面检测[M]. 杨力译. 北京: 科学出版社, 1982. 9~19
- 5 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 6 M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Hausler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular freeform surfaces[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 366~376
- 7 Marcus Petz, Rainer Tutsch. Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings [C]. *SPIE*, 2003, **5144**: 288~294
- 8 Tang Yan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 965~969
唐 燕, 苏显渝, 刘元坤 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量 [J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 965~969
- 9 Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1338~1341
赵文川, 苏显渝, 刘元坤 等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1338~1341
- 10 Peng Su, Robert E. Parks, Lirong Wang *et al.*. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(23): 4404~4412
- 11 Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Ray tracing and wavefront reconstruction based on structured-light imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1868~1871
赵文川, 苏显渝, 张启灿 等. 基于结构光的光线追迹与波前重建方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1868~1871
- 12 Xianyu Su, Wenjing Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **42**(3): 245~261