

文章编号: 0253-2239(2009)03-0688-09

非球面非零位检测中的回程误差分析与校正

刘 东¹ 杨甬英¹ 田 超¹ 翁俊森¹ 卓永模¹ 杨李茗²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

(² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘要 光学测试中常用非零位法来对非球面进行初步检测。由于非零位法偏离了零位条件, 导致检测得到的被测非球面面形与其真实面形存在一定程度的偏差(称之为回程误差)。分析了非球面非零位检测系统中的回程误差问题, 得出了回程误差与被测非球面口径、相对口径以及非球面本身面形误差均紧密相关的结论。针对回程误差的表现形式, 提出了有效校正回程误差的方法。计算机仿真及检测实验结果均表明, 该方法可以较好地解决非球面非零位检测中的回程误差问题。针对非球面非零位检测中回程误差问题所做的分析以及提出的相应校正方法, 有利于非球面非零位法检测精度的提高和系统的广泛应用。

关键词 非球面检测; 非零位检测; 回程误差; 误差校正

中图分类号 TH741.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0688

Analysis and Correction of Retrace Error for Nonnull Aspheric Testing

Liu Dong¹ Yang Yongying¹ Tian Chao¹ Weng Junmiao¹

Zhuo Yongmo¹ Yang Liming²

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract Nonnull test is often adopted in optical metrology for aspheric testing. But due to its violation of null condition, the obtained surface figure would be different from that of the real, which is called retrace error accordingly. Retrace error of nonnull aspheric testing is analyzed in detail with conclusions that retrace error has much to do with the aperture, relative aperture and surface shape error of the aspheric under test. Correcting methods are proposed according to the manner of the retrace errors. Both of computer simulation and experimental results show that the proposed methods can correct the retrace error effectively. The analysis and proposed correction methods bring much to the application of nonnull aspheric testing.

Key words aspheric testing; nonnull test; retrace error; error correction

1 引 言

由于非球面形状各异, 光学非球面检测一直以来都是个难题。经过长期发展, 人们探索出了多种检测非球面的方法。接触式轮廓仪^[1,2]是商用非球面检测系统较多采用的一种方法, 但由于其属于接触式测量, 探针容易对被测非球面造成损伤, 在应用上受到一定限制。目前, 在高精度检测中应用最多

的非接触检测方法是采用零位器件作为辅助工具的零位检测法, 其中包括无像差点法, 也有采用零位补偿镜(如 Offner 补偿镜^[3]、Dall 补偿镜^[4]等)的方法, 以及使用计算全息图(Computer-generated holograms)的方法^[5]等。这些零位方法虽然可以实现较高精度的检测, 但由于对于任意一个非球面, 都需要一个相应的零位器件与其对应, 通用性较差。

收稿日期: 2008-05-30; 收到修改稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(10176026)和现代光学仪器国家重点实验室重点(MOIJ08001)资助课题。

作者简介: 刘 东(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事光学非球面检测方面的研究。E-mail: nanotesting@gmail.com

导师简介: 杨甬英(1954-), 女, 博士, 教授, 主要从事光学精密检测方面的研究。E-mail: chuuyy@hzncnc.com

同时,加工、检测这些零位器件本身也是一项需要大量时间、智力和财力的工程。由于零位检测的这些特点,在对精度要求不是非常高的情况下,人们更倾向于用非零位检测方法检测非球面,如长波长法^[6]、双波长法^[7]、剪切法^[8~10]、高密度探测器法等。这些方法一定程度上实现了非球面的通用化检测,可以快速给出检测结果。然而,由于这些方法偏离了零位条件,导致不同程度的回程误差,因此使检测精度随被测非球面的口径及相对口径的增大而降低。

回程误差是由于被测面与参考面存在偏离,检测光线被待测面反射后不能沿入射时的路径原路返回,导致检测值与真实值之间的偏差。对于球面检测系统中的回程误差问题已有很多研究^[11,12],本文分析了非球面非零位检测系统中的回程误差问题,并提供了有力证据证明了回程误差与被测非球面口径、相对口径以及其本身面形误差均紧密相关的结论。针对回程误差的表现形式,提出了快速、有效校正回程误差的方法。计算机仿真及检测实验结果均表明该方法可以较好地校正非球面非零位检测中的回程误差。针对非球面非零位检测中的回程误差问题所做的分析以及提出的相应校正方法,有利于非球面非零位检测技术检测精度的提高和系统的广泛应用。

2 非球面非零位检测的回程误差分析

非球面非零位检测的检测光路如图 1 所示(由于旋转对称非球面在实际中应用最多,仅以旋转对称非球面为例进行讨论,其它情况非球面也可采用类似方法)。Asp 为被测非球面[方程为 $z=f(x)$], Sp 为参考球面, L_1 、 L_2 分别为消球差透镜和成像透镜(此处为后续推导方便均取为理想透镜,焦距分别为 f_1 和 f_2 ,两镜距离为 d),透镜 L_1 的焦点与参考球面球心交于 C_0 , C 为被非球面反射的检测光线与光轴的交点, F_2 为透镜 L_2 焦点,探测器平面 η 与透镜 L_2 焦平面的距离为 ΔL , P 为检测光线与探测器平面 η 的交点。平行光交透镜 L_1 于 I 点,并经其会聚后入射至被测非球面[与其交于 $A(x, f(x))$]。由于非球面与参考球面有偏离,产生纵向法线像差,导致反射后的光线交光轴于不同于 C_0 的 C 点,并再次通过 L_1 ,进而经过 L_2 ,最终交探测器平面于 P 点。

根据图 1 所示原理图,设光线 IA 交参考球面于 S 点,则非球面与参考球面偏差可表示为

$$N_0 = |AS| = \sqrt{x^2 + [R - f(x)]^2} - R, \quad (1)$$

其中 R 为参考球面的半径。

图 1 非球面非零位检测中的检测光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of light path in nonnull aspheric testing

根据三角计算及成像关系,对检测光线从 I 点(消球差镜上光轴 h 距离)到探测器平面 η 上 P 点进行光线追迹^[13]:

$$\begin{bmatrix} x_I \\ \theta_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ -\arctan(h/f_1) \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} x_A \\ \theta_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ -\arctan(h/f_1) - 2\arctan[df(x)/dx] \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\begin{bmatrix} x_P \\ \theta_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 + \Delta L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 + R - f(x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ \theta_A \end{bmatrix} \quad (2c)$$

则可得到检测光线从 I 点到探测器平面 η 处 P 点的光程

$$L_h = \frac{f_1 + R - f(x)}{\cos \theta_I} + \frac{f_1 + R - f(x)}{\cos \theta_A} + \frac{d}{\cos \theta_G} + \frac{f_2 + \Delta L}{\cos \theta_P} \quad (3)$$

的具体值。

而该光程相对于主光线路程 L_0 的光程差

$$D = L_h - L_0 \quad (4)$$

即为探测器检测得到的波前 W 。

在球面及平面检测中,检测系统经认真设计和良好装调后,一般直接认为探测器检测得到的波面相位 W 是被测非球面与参考波面偏离 N_0 的 2 倍,即

$$W = 2N_0, \quad (5)$$

这里 N_0 为被测面与参考波面的偏离,为了与后面的非球面检测相区别,我们暂简称上述理解为“球面检测原理”。

然而,在某些非球面非零位检测中公式(5)却并不一定适用。图 2 示出了由于非球面与参考面存在偏离^[14],检测光线被非球面反射后不能原路返回,从而导致检测值与真实值出现偏差,即回程误差。图 2 中, C_0 为非球面顶点球球心, C_0A 为检测光线,

C 为检测光线被非球面反射后与光轴的交点, AS 为非球面与参考球面的偏离。可以看到, 干涉仪检测得到的波面相位与 AS 并不是简单的 2 倍关系。

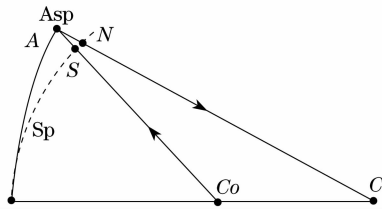


图 2 被测非球面与参考球面的偏离导致检测光线不能原路返回

Fig. 2 The reflected rays can not follow the original path because of the deviation between the reference spherical and the aspheric surface under test

非球面非零位检测时的回程误差极大地影响了系统的检测精度, 简单地套用球面检测原理, 在很多时候会导致被测非球面的检测面形与真实面形差别很大。根据形成原因, 可以将回程误差分为回程路径误差和回程器件误差两种。回程路径误差是由于检测光线被非球面反射后在几何路径上与参考波面光线不同所造成的误差。由于检测系统中器件的加工和装调误差在所难免, 当检测光线被非球面反射后与参考波面光线经历了不同路径时, 便会在各自路径上经历不同的器件误差, 从而导致最后的检测结果出现误差, 这种误差便是回程器件误差。由于器件加工、装调误差具有随机性, 无法事先定量, 且一般影响较小, 本文以下讨论都认为系统中所有器件均加工、装调良好, 回程器件误差可以忽略。对于回程路径误差, 根据表现形式不同, 可以分为轴向误差和坐标径向剪切误差两种。

2.1 轴向误差

设套用球面检测原理解非球面非零位检测时导致的测量误差为 Δ , 则

$$\Delta = W/2 - N_0, \quad (6)$$

并且相对误差可表示为

$$\epsilon = \Delta/N_0. \quad (7)$$

图 3 为利用顶点球补偿方式对相对口径为 $f/2$ 的非球面进行非零位检测时, 套用球面检测原理所导致的误差情况。图 3(a) 示出了探测器平面波前 PV 值 (Peak-valley value, 峰谷值) 的一半 $W/2$ 及非球面与参考球面的偏离 N_0 , 图 3(b) 和图 3(c) 分别为套用球面检测原理所导致的绝对误差和相对误差。从图 3 可以看出在被测非球面相对口径相同的情况下, 误差随着被测非球面口径的增大而迅速增大。

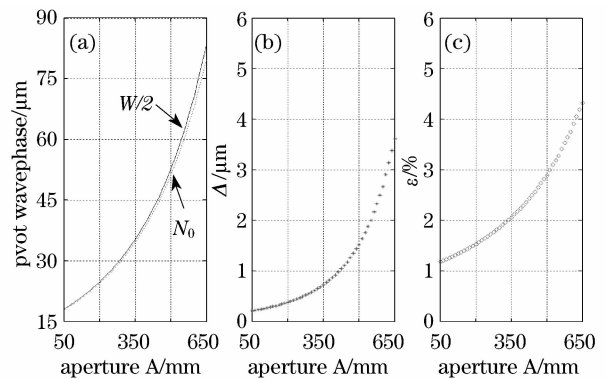


图 3 利用顶点球补偿方式对相对口径为 $f/2$ 的非球面进行非零位检测时, 套用球面检测原理所导致的误差情况。(a) 表示探测器平面波前的一半及非球面与参考球面的偏离; (b) 为套用球面检测原理所导致的绝对误差; (c) 为套用球面检测原理所导致的相对误差

Fig. 3 Error induced by the sphere-testing principle for an $f/2$ aspheric with vertex-matched compensation in nonnull testing. (a) Half of the wavefront at the detector and the deviation between the aspheric and the reference sphere; (b) absolute error induced by the sphere-testing principle; (c) relative error induced by the sphere-testing principle

图 4 为利用顶点球补偿方式对口径为 550 mm 的非球面进行非零位检测时, 套用球面检测原理所导致的误差情况。图 4(a) 示出了探测器平面波前 PV 值的一半 $W/2$ 及非球面与参考球面的偏离 N_0 , 图 4(b) 和图 4(c) 分别为套用球面检测原理所导致的绝对误差 Δ 和相对误差 (ϵ)。从图 4 可以看出在被测非球面口径相同的情况下, 误差随着被测非球面相对口径的增大而增大。

从图 3 和图 4 可以看出, 在非球面非零位检测中套用球面检测原理的“2 倍关系”导致探测器平面波前的一半与被测非球面理论值和参考球面之间偏离 N_0 存在偏差, 并且该偏差随着相对口径和口径的增大而增大。只有在被测非球面口径和相对口径都较小时, 即被测非球面与参考球面偏离较小时, 这种偏差才相对较小。由于上述之误差表现为检测结果沿光轴方向上的 PV 值的偏差, 故称为轴向误差。轴向误差导致无法正确判断被测非球面的面形偏差的大小, 并且当被测非球面的面形偏差小于或接近固有轴向误差时, 还将导致被测非球面的面形被轴向误差所淹没, 可能得到与实际面形差异巨大的检测结果。

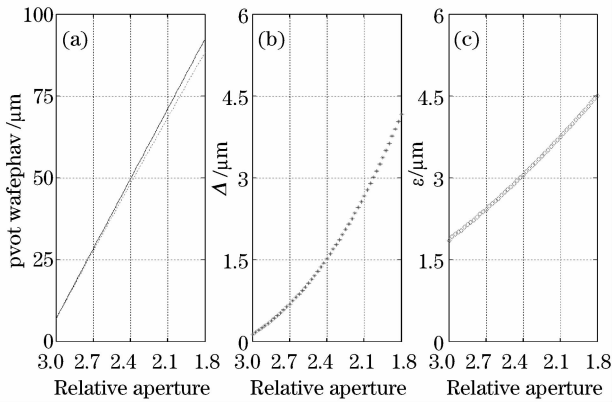


图4 利用顶点球补偿方式对口径为550 mm的非球面进行非零位检测时套用球面检测原理所产生的误差情况。(a)为探测器平面波前的一半及非球面与参考球面的偏离;(b)为套用球面检测原理所带来的绝对误差;(c)为套用球面检测原理所带来的相对误差

Fig. 4 The error induced by sphere-testing principle for a 550 mm aspheric with vertex-matched compensation in nonnull testing. (a) Half of the wavefront at the detector and the deviation between the aspheric and the reference sphere; (b) error induced by the adopting the sphere-testing principle; (c) relative error induced by the sphere-testing principle

2.2 坐标径向剪切误差

除了轴向误差外,由于畸变波前在光学系统中传播时不断发生变形,在套用球面测量原理进行非球面非零位检测时,还会导致另外一种误差,即坐标径向剪切误差。

根据图1系统,当被测非球面没有面形误差时,利用三角计算和光线追迹也可以很容易地推导出探测器平面P点坐标。

图5示出检测光线在非球面以及探测器平面上的归一化极坐标图(被测非球面为相对口径 $f/2.5$,口径100 mm的抛物面,补偿方式为消球差镜顶点球补偿)。图5(a)和图5(b)为检测光线分别在非球面和探测器平面上的归一化极坐标图。从图中可以看到,由于被测非球面与参考球面存在偏离,被测非球面上等间隔环带的检测光线被非球面反射后将沿着与参考波面不同的路径到达探测器平面。由于畸变非球面波前在光学系统中传播时会不断产生形变,因此其会出射至探测器平面上的不同位置,从而导致环带分布极不均匀。由于探测器检测得到的波面相对于被测非球面在径向上有一个坐标剪切,故称这种回程误差为坐标剪切误差。大量仿真结果表明,坐标剪切误差随被测非球面及检测系统的变化

而变化。坐标剪切误差将导致检测结果不能真实反映被测非球面的面形分布信息,如被测非球面在0.6环带(图5(a)中三角标记环带)的面形误差将出现在检测结果中0.2左右的环带(图5(b)中三角标记环带)。

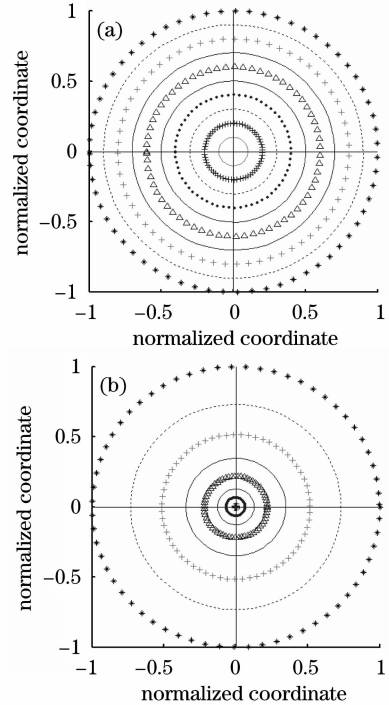


图5 非零位检测中非球面波面传播过程导致的坐标径向剪切效应。(a)检测光线在非球面上的归一化极坐标;(b)检测光线在探测器平面上的归一化极坐标(相同标记表示相同检测光线)

Fig. 5 Coordinate shearing effect induced by wavefront propagation in nonnull aspheric testing. (a) Normalized coordinates of the testing rays on the aspheric; (b) normalized coordinates of the testing rays on the detector

综上所述,由于轴向误差和坐标径向剪切误差的存在,实际检测波前给出的结果将不同程度地偏离被测面形的真实值,在某些情况下甚至还会产生错误。在非零位检测中,只有当被测非球面与参考球面或平面非常接近,检测光线被非球面反射后会基本沿原路返回时,才可以套用球面或平面检测原理的“2倍关系”,最后的回程误差才可以忽略。

2.3 具有面形缺陷的非球面非零位检测的回程误差分析

上述分析都是在被测非球面为理想值的情况下进行的。当被测非球面具有面形缺陷,非零位法检测所引起的回程误差不仅更加复杂,还将是不可预知的。

图 6 为针对非零位法应用于检测具有一定面形缺陷的相对口径为 $f/1.8$, 口径 150 mm 的抛物球面进行的计算机仿真结果(补偿方式为顶点球补偿, 检测波长 λ 为 $1.064 \mu\text{m}$)。图 6(a)为被测非球面理论值与顶点球的偏离(记为 N_{A-V}), 图 6(b)为被测非球面的面形误差(记为 W_{Asp}), 图 6(c)为探测器平面上波前(记为 W_{CCD})的一半。图 6(d)为套用球面检测原理所得到的被测非球面的面形(记为 W_{Test})。

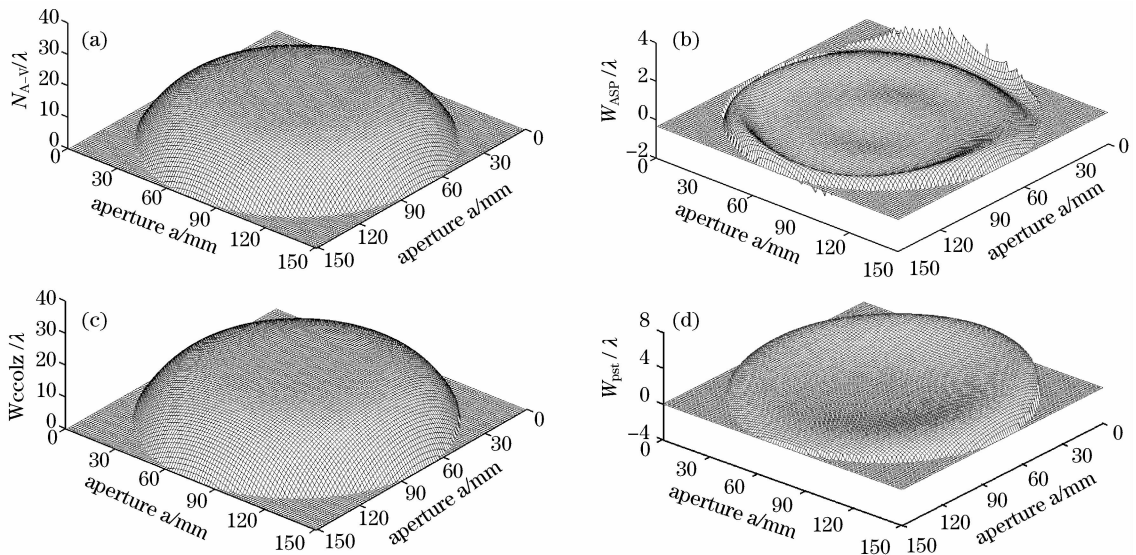


图 6 针对非零位法检测存在一定面形缺陷的抛物球面(相对口径为 $f/1.8$, 口径 150 mm)进行的计算机仿真(补偿方式为顶点球补偿, 检测波长 λ 为 $1.064 \mu\text{m}$)。(a) 被测非球面理论值与顶点球的偏离; (b) 被测非球面的面形误差; (c) 探测器平面上波前的一半; (d) 套用球面检测原理得到的检测结果

Fig. 6 Computer simulation for nonnull testing of a paraboloid ($f/1.8$, 150 mm) with some surface defect.

(a) Deviation between the aspheric theoretical value and its vertex sphere; (b) figure error of the paraboloid under test; (c) half of the wavefront on the detector plane; (d) testing result by sphere-testing principle

表 1 仿真实验数据结果(检测波长 λ 为 $1.064 \mu\text{m}$)

Table 1 Numerical results of computer simulation ($\lambda=1.064 \mu\text{m}$)

	PV / λ	RMS / λ
N_{A-V}	25.1017	7.4795
W_{Asp}	1.3953	0.1393
$W_{\text{CCD}/2}$	25.1415	7.1018
W_{Test}	2.2750	0.5132

从上述结果可以看出, 由于回程误差以及被测非球面面形误差的共同作用, 检测结果与实际面形相差甚大, 已经无法表达实际面形。

非零位法经常被用于非球面的初级加工过程中, 以指导加工方向。从上面的结果可以看出, 当被测非球面与参考波面偏离稍大时, 由于回程误差的存在, 利用球面检测原理的“2 倍关系”不仅将得不到较高精度的结果, 有时甚至还会出现错误的检测结果。所以, 对于口径和相对口径稍大的非球面, 利

比较 6(d)与图 6(b), 可以看到检测结果与实际面形有很大差别。这是由于在非零位检测系统中, 回程误差将导致检测结果在轴向和径向都存在误差, 即使被测非球面没有面形误差时也会产生误差; 当被测非球面具有面形误差时, 由于面形误差所导致的误差将与原始理论误差混合在一起, 最终导致检测结果的极度不准确。表 1 为本仿真实验的数据结果。

用非零位法进行检测时都需要进行修正, 没有经过修正的检测结果是完全不可信的。

3 非零位检测的回程误差校正

由于非零位法检测非球面具有上述诸多误差, 寻求一种可以对其进行有效校正的方法, 使得在被测非球面理论值与参考波面偏差较大时, 非零位法仍可以实现较高精度的快速检测是非常必要的。

根据上面的分析, 探测器平面的波前 W_{Test} 在包含了被测非球面本身面形的同时, 还含有轴向误差、坐标径向剪切误差和由被测非球面本身面形缺陷所导致的误差等。所以, 探测器平面的波前 W_{Test} 可以表示为

$$W_{\text{Test}} = Z + R + E + 2 \sum, \quad (8)$$

其中 Z 为轴向误差, R 为坐标径向剪切误差, E 为由于被测非球面本身面形缺陷所导致的误差, \sum 为

被测非球面的面形。需要注意的是,式(8)中的“+”并不意味着各个变量之间是简单的加和关系,实际上探测器平面的波前是各种误差和被测非球面的面形共同作用的结果。

轴向误差是非球面非零位检测的主要误差,并随被测非球面的口径和相对口径的增大而增大。在非零位检测中,由于被测非球面理论值与参考波面存在固有偏差,即使被测非球面没有面形误差,探测器平面也会得到一具有一定峰谷值的相位。通过光线追迹可以很容易得到探测器平面上的理论相位,从探测器实际检测得到的相位中去除该理论相位,就可以消除轴向误差。

坐标径向剪切误差主要是由于对非球面进行补偿后返回的波面也是一个非球面波前,并且该波前在口径范围内各处的波前斜率不同,导致波前在径向上产生坐标剪切。从图 5 中可以看出,图 5(a)和图 5(b)之间的极坐标存在一种非线性对应关系,通过对探测器平面与被测非球面进行坐标映射就可以消除坐标剪切误差。其中,映射函数为图 5(a)与(b)之间坐标对应关系的逆函数,如图 7 所示。

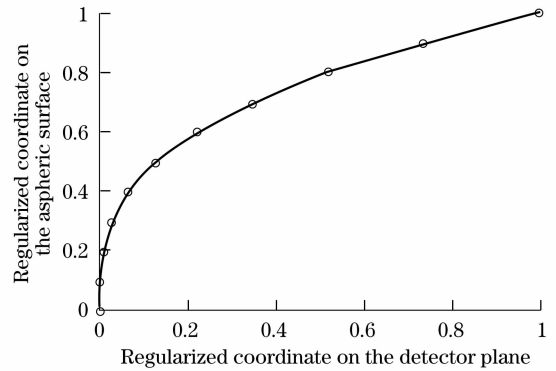


图 7 被测非球面坐标与探测器平面坐标间的映射关系
Fig. 7 Transformation between the coordinates of the aspheric surface and that of the detector plane

由于被测非球面本身面形无法事先确知,所以由被测非球面本身面形缺陷所导致的误差不能通过直观方法去除。在被测非球面本身面形尚好的情况下,可以认为由被测非球面本身面形所导致的误差可以忽略。实际上,在检测球面和平面时也遇到同样的问题,即由于被测表面具有面形误差,导致检测光线在被反射后形成具有像差的平面波,不能完全沿原路返回。这时候,由于面形误差一般均较小,故认为由被测件本身面形所导致的误差可以忽略。

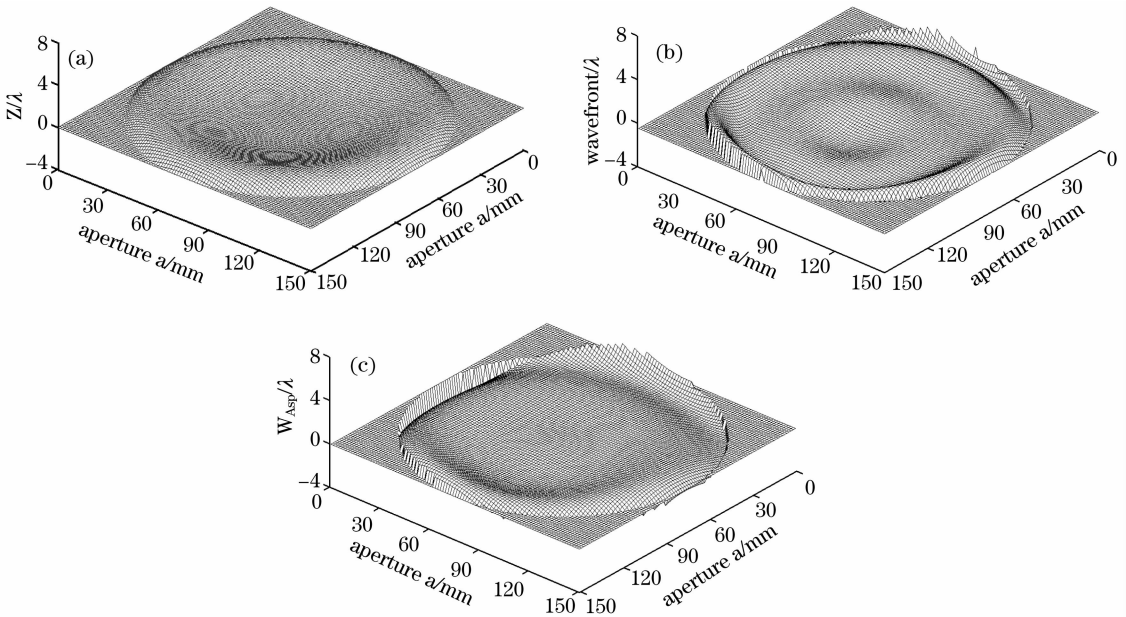


图 8 对 2.3 节中非零位法检测的非球面结果进行误差校正的计算机仿真,(a)为由于被测非球面理论值与参考波面存在固有偏差而导致的轴向误差,(b)为图 6(c)中去除了轴向误差后的情况,

(c)为去除了图 8(b)中的坐标径向剪切误差后的结果

Fig. 8 Error correction for the nonnull aspheric testing in section 2.3. (a) Axial error induced by the deviation between the theoretic aspheric and the reference wavefront; (b) result after eliminating axial error from the wavefront in Fig. 6(c); (c) result after eliminating coordinate shearing error from the wavefront in Fig. 8(b)

图 8 为误差校正过程仿真结果,被测非球面及其面形误差均与 2.3 节相同。图 8(a)为由于被测非球面理论值与参考波面存在固有偏差而导致的轴向误差,图 8(b)为图 6(c)中去除了轴向误差后的情况。由于轴向误差在被测非球面理论值、参考波面以及光学系统确定后就基本不变了,当被测非球面面形误差相对轴向误差较小或与其等量级时,检测结果将几乎不能反映被测非球面的实际面形。可以看到,在去除了轴向误差以后,被测非球面的面形已经基本显露,只是在径向上有变形。这可以通过对探测器平面坐标和被测非球面坐标进行一次坐标映射来实现。图 8(c)即为去除了坐标径向剪切误差后的结果,可以看到其与被测非球面的面形图[6(b)中所示]已经非常相近了。如前所述,由于被测非球面本身面形无法事先确知,以致由被测非球面本身面形缺陷所导致的误差不能通过直观方法去除,故这里也仅认为由被测非球面本身面形所导致的误差可以忽略。

本方法将回程误差分为轴向误差、坐标径向剪切误差和由被测非球面本身面形缺陷所导致的误差等,并针对每种误差分别提出了校正方法。对于任意检测系统仅需进行一次建模,当被测件及参考波面确定后,检测过程中所产生的轴向误差及坐标剪切误差便可以通过简单的光线追迹及数值计算进行校正。

4 非零位非球面检测中的回程误差补偿实验

为了验证上述误差补偿方法的正确性,特在自行研制的泰曼格林干涉仪(以下简称非零位干涉仪)上进行了非零位检测回程误差补偿实验。由于本文提出的非零位检测回程误差校正方法并不局限于非球面检测,而是适用于任意非零位过程,故可利用下述实验来证明该方法的正确性^[15]。被测对象为一大曲率半径球面,曲率半径为 1933.2 mm,有效口径为 18 mm;干涉仪光源波长为 632.8 nm。由于被测球面与平面非常接近,故可将其放入平面的光路布局中进行非零位检测。实验原理图如图 9 所示。

系统中各透镜均进行过校准,并在光线追迹软件中建模。利用建立的模型进行光线追迹,得出轴向误差和坐标剪切误差映射曲线,将检测直接得到的数据按照上节所述的误差补偿方法进行校正。与之做对比的是利用 Zygo GPI 移相干涉仪对被测大曲率球面进行球面检测的检测结果。图 10 示出了对被测件进行传统非零位检测后利用本文提出方法

进行校正的结果,并与 Zygo 干涉仪进行了对比。图 10(a)为采用平面检测原理得到的检测结果,结果显示被测件具有一较大旋转对称面形误差。然而,由于回程误差的影响,被测件的面形并不是图 10(a)所示分布。图 10(b)为对图 10(a)非零位检测结果进行了轴向误差校正后的结果,图 10(c)为对进行了轴向误差校正的波面再进行径向误差校正的结果,图 10(d)为 Zygo 干涉仪对被测件进行球面检测的检测结果。可以看出经过误差校正后的结果与 Zygo 干涉仪的检测结果基本相同。需要注意的是,由于被测件与参考波面(平面)偏离较大,轴向误差较突出,校正效果明显。但由于被测件相对口径较小,导致径向坐标剪切误差较小,坐标映射曲线几乎为直线,故进行径向坐标剪切误差校正效果不明显。

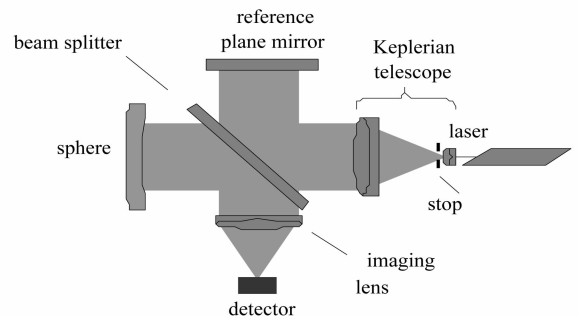


图 9 误差补偿实验原理图

Fig. 9 Layout of error correction experiment

表 1 为实验的数据结果,其中 W_{NN} 、 W_{FCNN} 、 W_{MCNN} 以及 W_{Zygo} 分别为传统非零位检测结果、经过轴向误差校正后的结果、再经过坐标径向剪切误差校正后的结果以及 Zygo 干涉仪球面检测结果。

由图 10 及表 1 可以看出,利用传统的非零位检测方法将得到具有较大误差的结果,并不能反映被测件的真实分布;对传统非零位法检测得到的数据进行简单的校正后,即可得到 PV 值优于 $\lambda/15$ 的结果。

5 讨论及误差分析

在非球面非零位检测中,被测非球面理论形状与参考波面本身就具有一定的偏离,导致即使被测件完全理想在探测器上也将得不到一般意义上的“零条纹”。这里的参考波面不一定是球面波或平面波,它可以是任何一种能够使从非球面上反射回来的畸变波前被探测器所分辨的波前。对于浅度非球面,可以直接用消球差透镜所产生的球面波作为参考波面;对于深度非球面,这时的主要工作便是寻找一种波面可以对非球面进行适当补偿^[15]。

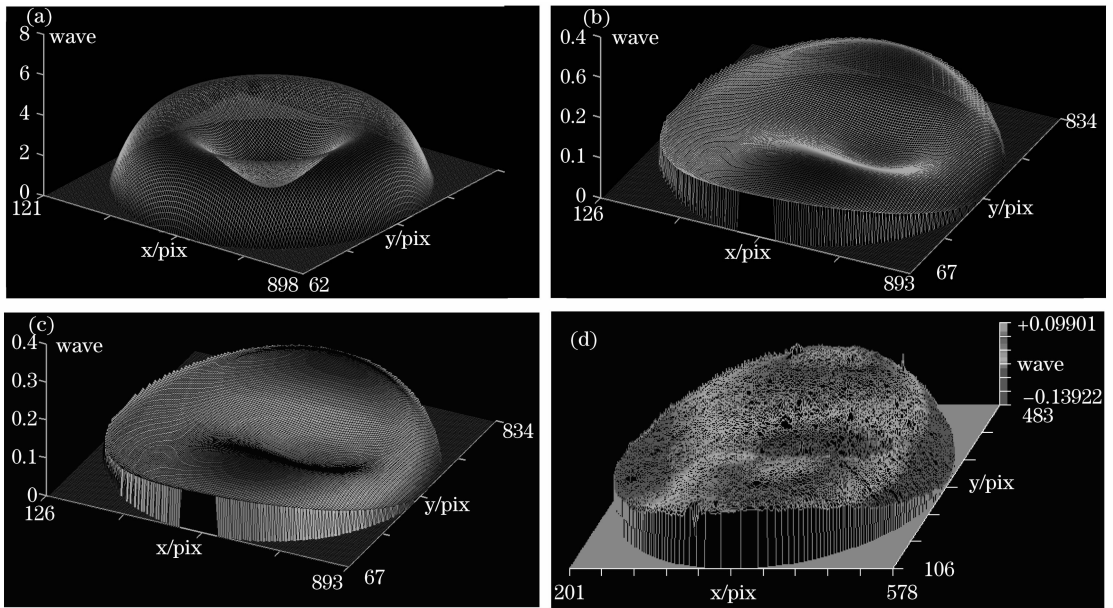


图 10 非零位干涉仪进行误差补偿后的检测结果与 Zygo 干涉仪检测结果对比。(a) Zygo 干涉仪对被测件进行球面检测的检测结果；(b) 非零位干涉仪对被测件进行非零检测后并经过校正的结果

Fig. 10 Comparison of testing result in nonnull interferometer and that of Zygo interferometer, (a) Testing results by Zygo interferometer in spherical setup; (b) testing result by nonnull interferometer in planar setup after error correction

表 1 回程误差补偿实验结果

Table 1 Experimental results of retrace error correction

Value	W_{NN}	W_{FCNN}	W_{MCNN}	W_{ZYGO}
PV	3.9127	0.2890	0.2893	0.238

回程误差校正方法的误差源主要包括检测系统的建模误差、由被测件面形所导致的路程误差以及数值计算误差等。虽然在非零位检测干涉图解调过程以及误差校正过程中进行了大量计算, 但将数值计算误差控制在 $\lambda/500$ 是可以做到的, 所以前两个误差是应用本文提出的校正方法的非零位非球面检测系统的主要误差源。

校正方法的精度很大程度上取决于对系统建模的精确程度。实验使用的球径仪精度优于 0.01% , 镜头的装调间隔误差小于 $2 \mu\text{m}$, 控制器件间隔的移动导轨的定位精度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。经过大量仿真计算, 在上述建模精度下本方法的重构精度 PV 值优于 $\lambda/15$ 。同时, 检测系统需要设计得尽量简单, 包含的光学元件个数越少越容易建模。对于一台非零位干涉仪, 只要对各元件均精确建模, 以后每次测量仅需确定被测非球面与干涉仪相对位置关系便可进行通用化检测。实际上, 很多非球面检测方法都需要对光学系统进行建模, 如计算全息法^[5]、亚奈奎斯特法^[15]等。

被测非球面与参考波面偏离得越大, 回程误差也就越大, 利用上述方法进行误差校正也就越有必

要。但是上述方法进行误差校正时, 对被测非球面与参考波面偏离是有限制的, 即偏离导致的探测器平面上的波前位相不能超过探测器的分辨能力并且能够被正确重构出来。同时, 由于在进行误差校正时, 认为由被测件本身面形所导致的路程误差可以忽略不计, 所以在进行误差校正时要求被测件面形相对较好。

对回程误差进行分析和校正的方法同样适用于非旋转对称非球面。需要注意的是对于非旋转对称非球面, 由于坐标径向剪切误差在各个径向上大小不同, 在对其径向校正时需要各个径向上分别求取映射函数并分别校正。同时, 该校正方法对被测件的凸凹也没有要求, 只要利用某种手段使得返回的波面所产生的干涉条纹可以被探测器 (如 CCD) 所分辨即可。

6 结 论

本文从光线追迹角度出发, 详细论述了非球面非零位检测系统中的原理误差问题。由于没有达到零位条件, 检测结果在轴向和径向都会产生很大误差。针对存在面形缺陷的非球面非零位检测进行了仿真实验, 结果表明当被测非球面与参考波面具有一定偏离时, 在原理误差与非球面本身面形误差的共同作用下, 检测结果与非球面的真正面形相差甚远。针对回程误差的不同表现形式提出了有效校正

回程误差的方法。计算机仿真与实验结果均表明该方法可以快速、有效校正非球面非零位检测中的回程误差,大大提高了非球面非零位检测的精度。

参 考 文 献

- 1 Paul Scott. Recent developments in the measurement of aspheric surfaces by contact stylus instrumentation[C]. *SPIE*, 2002, **4927**:199~207
- 2 Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng *et al.*. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1224~1228
李 直,赵 洋,李达成 等. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1224~1228
- 3 Abe Offner. A null corrector for paraboloidal mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 1963, **2**: 153~156
- 4 Wu Fan. Design of dall compensator for aspherical surface null testing[J]. *J. of Appl. Opt.*, 1993, **14**(02):1~4
伍 凡. 非球面零检验的 Dall 补偿器设计[J]. *应用光学*, 1993, **14**(02):1~4
- 5 J. C. Wyant, V. P. Bennett. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**: 2833
- 6 Kown O, J. C. Wyant, C. R. Hayslett. Rough surface interferometry at 10.6 microns [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**: 1862~1869
- 7 J. C. Wyant, K. Creath. Two-wavelength phase-shifting interferometer and method[P]. U. S. Patent No. 4,1989,832, 489
- 8 Tsuguo Kohno, Daiji Matsumoto, Takanori Yazawa, *et al.*. Radial shearing interferometer for in-process measurement of diamond turning [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**: 2696~2699
- 9 Liu Dong, Yang Yongying, Shen Yibing *et al.*. System optimization of radial shearing interferometer for aspheric testing [C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68340U
- 10 Yang Yongying, Liu Dong, Shen Yibing *et al.*. Study on testing larger asphericity in nonnull interferometer[C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68340T
- 11 Joseph M. Geary, Marty Yoo, Guojun Si. Retrace error: a case study[C]. *SPIE*, 1992, **1776**: 98~105
- 12 Neil Gardner and Angela Davies. Retrace error evaluation on a figure-measuring interferometer [C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690V-1-8
- 13 Ting-Chung Poon, Taegeun Kim. "Geometrical Optics" in *Engineering Optics with Matlab* [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2006
- 14 Junmiao Weng, Yongying Yang, Dong Liu *et al.*. The wavefront aberration analysis and testing accuracy evaluation for the large aberration aspheric system based on the best fit sphere [C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68342V
- 15 J. E. Greivenkamp, R. O. Gappinger. Design of a nonnull interferometer for aspheric wave fronts[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**: 5143~5151