

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209595

基于最小 PV 值的非球面测量 Z 轴定位方法*

兰梦辉¹, 李兵^{1,2}, 魏翔^{1,3}, 吴修远¹, 刘晓¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049; 2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710049; 3. 西安交通大学苏州研究院 苏州 215123)

摘要:在基于 Zygo 干涉仪的非球面检测中,沿光轴(Z轴)方向的定位精度直接影响测量结果的准确性。本文提出了一种基于最小 PV 值的非球面测量 Z 轴定位方法,分析了非球面与参考球面波的理论模型,推导出了对应的最佳参考球面波半径、顶点偏离量以及理论测量位置,并在此基础上完成了沿 Z 轴方向 0.001 mm 精度范围内的定位过程。该方法可将被测非球面定位至理论测量位置,有效地降低由于定位误差造成的测量误差;准确找到参考球面波半径,对基于 Zygo 干涉仪的点云重构和拼接方法也具有重要意义。对一直径为 108 mm 的非球面镜进行了实验验证,定位后的结果与最佳参考球面波的点云数据计算结果对比,结果接近,证明了定位方法的正确性;并与零位检测结果相比,PV 值残差为 0.047 λ ,RMS 残差为 0.019 λ ,进一步证明了该定位方法的准确性。

关键词: 非球面检测;干涉测量;Z轴定位;最小 PV 值

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Minimum PV-based Z-axis positioning method for aspheric measurement

Lan Menghui¹, Li Bing^{1,2}, Wei Xiang^{1,3}, Wu Xiuyuan¹, Liu Xiao¹

(1. State Key Laboratory of Mechanism Manufacture System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. International Joint Laboratory for Mico/Nano Manufacturing and Measurement Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Suzhou Academy, Xi'an Jiaotong University, Suzhou 215123, China)

Abstract: In aspheric surface detection based on the Zygo interferometer, the precision of the aspheric surface's location along the optical axis (Z-axis) direction has direct effect on the accuracy of the measurement results. This article proposes a Z-axis positioning method for aspheric measurements based on the minimum PV value. The theoretical model of aspheric and reference spherical waves is evaluated, and the appropriate reference spherical wave radius, vertex deviation, and theoretical measurement location are developed. The positioning procedure along the Z-axis direction is completed within 0.001 mm precision. The proposed method can precisely identify the theoretical measurement location and efficiently decrease the measurement error introduced by the positioning error. It can also precisely determine the reference spherical wave radius, which is essential for the point cloud reconstruction and stitching method based on the Zygo interferometer. The positioning of an aspherical mirror with a diameter of 108 mm is evaluated experimentally, and the positioning results are close to the calculated results of the point cloud data of the best reference spherical wave, demonstrating the method's correctness. The PV residuals are 0.047 λ and the RMS residuals are 0.019 λ compared to the null testing results, which further demonstrates the positioning method's accuracy.

Keywords: aspheric detection; interferometry; Z-axis positioning; minimum PV-value

收稿日期: 2022-04-12 Received Date: 2022-04-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(52105482)、苏州市重点产业技术创新项目(SYG201922)、西安交通大学基本科研业务费—自由探索与创新类项目(xzy022021016)资助

0 引言

非球面光学零件具有矫正像差、改善像质、扩大视场和增大作用距离的优点,同时还能够减轻系统重量,减少占用空间,因此非球面元件正越来越多地被用于空间光学、军事国防、民用高科技等领域^[1-2]。随着这些应用领域的快速发展,对非球面的精度要求也越来越高,需要更高精度的非球面检测方法来保证非球面的高精度制造。依据非球面不同加工阶段的检测需求,国内外出现了多种非球面面形检测方法,根据检测原理的不同,主要可以分为非干涉测量法和干涉测量法^[3-6]。其中,干涉测量法包括零位测量法和非零位测量法,国内的检测手段多依赖进口的菲索型和泰曼格林型干涉仪,这类干涉仪均需配备标准球面镜头,通过标准镜头产生参考球面波来进行测量。

零位测量法和非零位测量法都会涉及到非球面沿光轴方向上的定位问题,不管是用球面波还是补偿后的非球面波来匹配测量待测非球面,都需要将待测非球面沿光轴方向定位到准确位置才能保证测量数据的有效性和准确性,这是进行后续面形数据处理的重要前提^[7-8]。另外,文献[9]针对中心偏移误差在面形测量中的作用机理,推导了中心偏移误差模型,并在此基础上提出了一种基于二维像素矩阵的中心偏移误差补偿方法。文献[10]分析了非球面非零位检测中调整误差、回程误差以及干涉仪系统误差,进行了非零位横向剪切干涉测量与波前重构方面的研究。在非球面的干涉测量中,传统的光轴(Z 轴)方向的定位方法是通过观察干涉条纹寻找猫眼位置,即参考光的出射点位置,然后参考猫眼位置将非球面移至测量位置,虽然精密导轨能够保证非球面沿光轴方向进行移动,但是仅通过观察干涉条纹是难以准确定位猫眼的,误差较大,而且也会受到待测非球面自身面形误差的影响。对于微米级精度的非球面测量,传统的定位方法可以满足测量定位要求,但对于亚微米甚至更高精度要求的非球面检测,这种方法只能作为粗定位阶段的辅助手段。

另外,在非球面的拼接制造和检测领域,特别是在大型天文望远镜项目中,采用分体制造并拼接成为大尺寸光学元件的方法,成为主流研究方向^[11-16]。在拼接的过程中需要高精度的检测手段来获取调整参数,其中中国科学技术研究院长春光机所王孝坤等,通过激光跟踪仪、三坐标测量技术等来获取面型信息,进而完成调整^[17-20]。现阶段如果能使用干涉仪等更加精密的手段来获取拼接子镜的面型信息,也能进一步提高拼接精度和效率。然而,目前国外的一些高精度干涉仪部分技术不对外开放,例如 Zygo 干涉仪不会提供测量过程中使用的具体参考

球面波等信息。若能解决上述问题,对于使用干涉仪进行拼接调整技术等方面的研究具有重要意义。针对如何准确获取参考球面波的半径、位置等信息等问题,本文所提出的方法能准确得到参考球面波半径等信息,并将被测非球面定位至理论测量位置。

在非球面干涉测量中,针对非球面沿光轴(Z 轴)方向的定位问题,提出了一种基于最小 PV 值的 Z 轴定位方法,分析了非球面与参考球面波的理论模型,推导出了最小 PV 值对应的最佳参考球面波半径、顶点偏离量以及理论测量位置,并进行实验验证,完成了沿 Z 轴方向 0.001 mm 精度范围内的定位过程。该方法可以准确找到最佳测量位置,即定位至理论测量位置,有效地降低由于定位误差造成的测量误差。

1 理论分析

在进行最小 PV 值的测量位置计算之前,先引入非球面度的概念。非球面加工和检测中常引入最接近比较球面(也叫最适球面)的概念,将非球面与这个最接近比较球面的偏离定义为非球面度。在非球面检测中,有时仅能通过球面干涉仪检测非球面,得到非球面相对于最接近球面的偏离量,然后与理论计算的非球面度相比较。

非球面最为常见的是回转对称非球面,包括抛物面、双曲面和椭球面等二次回转曲面以及高次回转曲面等。如图 1 所示,例如对于抛物面或椭球面二次回转对称曲面来说,不同的参考球面会与非球面在不同位置相切,显然其最大偏离量出现在顶点或边缘位置。那么,对于每一个参考球面会有一个相应的最大偏离量 δ_{\max} ,定义最佳参考球面就是使得这个最大偏离量 δ_{\max} (即 PV 值)最小的参考球面。

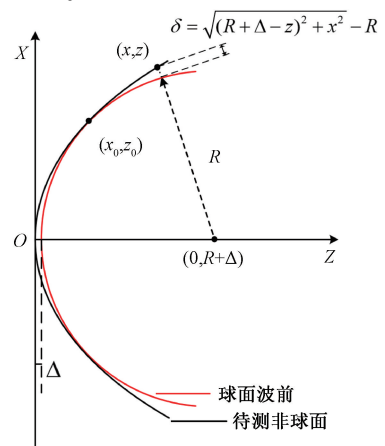


图1 非球面测量几何关系示意图

Fig. 1 Schematic of the geometric relationship of aspheric measurement

以某口径为 D 的二次非球面为例,其子午线方程为:

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

设与其全口径所匹配的参考球面波与非球面的切点坐标为 $(x_0, f(x_0))$, 则切点位置法线的斜率为 $k = 1/f'(x_0)$, 则法线方程为:

$$z_q = -\frac{1}{f'(x_0)}(x - x_0) + f(x_0) \quad (2)$$

令 $x=0$ 可得球心坐标为 $(0, \frac{x_0}{f'(x_0)} + f(x_0))$, 则球面波半径为球心与切点之间的距离, 即参考球面波半径如式(3)所示。

$$\delta_{\min} = \min \left\{ \max \left\{ \begin{aligned} &\delta(0, x_0) \\ &\delta\left(\frac{D}{2}, x_0\right) \end{aligned} \right\} = \min \left\{ \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{x_0}{f'(x_0)} + f(x_0) - \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{x_0}{f'(x_0)}\right)^2} \\ &\sqrt{\left(\frac{x_0}{f'(x_0)} + f(x_0) - f\left(\frac{D}{2}\right)\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{x_0}{f'(x_0)}\right)^2} \end{aligned} \right\} \right\} \quad (6)$$

显然 $\delta(0, x_0)$ 是随着切点坐标 x_0 的增大而增大的, 在 $x_0 = 0$ 处, $\delta(0, x_0) = 0$; 而 $\delta\left(\frac{D}{2}, x_0\right)$ 是随着切点坐标 x_0 的增大而减小的, 在 $x_0 = D/2$ 处, $\delta\left(\frac{D}{2}, x_0\right) = 0$; 则必然存在某处 $x_0 = x'_0$, 使得 $\delta(0, x'_0) = \delta\left(\frac{D}{2}, x'_0\right)$, 则有:

$$\delta_{\min} = \min \left\{ \max \left\{ \begin{aligned} &\delta(0, x_0) \\ &\delta\left(\frac{D}{2}, x_0\right) \end{aligned} \right\} \quad x_0 \in \left[0, \frac{D}{2}\right] = \min \left\{ \begin{aligned} &\delta(0, x_0), x_0 \in \left[x'_0, \frac{D}{2}\right] \\ &\delta\left(\frac{D}{2}, x_0\right), x_0 \in \left[0, x'_0\right] \end{aligned} \right\} = \delta(0, x'_0) \quad \text{or} \quad \delta\left(\frac{D}{2}, x'_0\right) \quad (7)$$

通过对方程 $\delta(0, x'_0) = \delta\left(\frac{D}{2}, x'_0\right)$ 的化简可得到方程:

$$x_0'^2 + \left(\frac{x_0'}{f'(x_0)}\right)^2 = \frac{\left(f\left(\frac{D}{2}\right)\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 \times f\left(\frac{D}{2}\right)} \quad (8)$$

通过求解方程式(8)即可得到最佳参考球面与非球面的切点坐标 x'_0 , 代入式(3)、(4)、(6)得到最佳参考球面的半径 R 和顶点偏离量 Δ , 非球面相对于最佳参考球面的最大非球面度 δ_{\max} (即最小 PV 值), 此时最小 PV 值对应的理论测量位置为 $S = R + \Delta$ 。

$$R = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{x_0}{f'(x_0)}\right)^2} \quad (3)$$

顶点偏离量为:

$$\Delta = \frac{x_0}{f'(x_0)} + f(x_0) - \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{x_0}{f'(x_0)}\right)^2} \quad (4)$$

此时, 非球面子午线上任意一点 $(x, f(x))$ 处的偏离量为:

$$\delta(x, x_0) = \sqrt{(R + \Delta - f(x_0))^2 + x^2} - R \quad (5)$$

$$\left(x \in \left[0, \frac{D}{2}\right], x_0 \in \left[0, \frac{D}{2}\right]\right)$$

由于最大偏离量出现在顶点或边缘位置, 则非球面相对于最佳参考球面的最大非球面度 (即最小 PV 值) 为:

2 定位方法

根据传统的粗定位方法, 仅通过观察寻找猫眼位置, 再将非球面移至测量位置, 如图 2 所示。通过粗定位方法得到的初定位猫眼位置并不准确, 与本方法得到的实际猫眼位置具有一定的偏差, 使干涉仪产生的球面波与本方法的最佳参考球面不一致, 从而影响测量数据的有效性和准确性。对于高精度要求的非球面检测, 这种方法只能作为粗定位阶段的辅助手段。

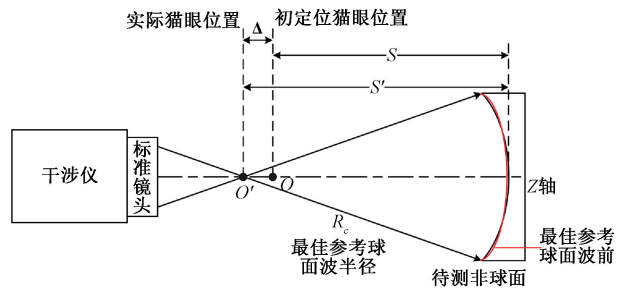


图 2 非球面测量 Z 轴定位示意图

Fig. 2 Schematic of Z-axis positioning for aspheric measurement

根据理论模型的推导结果, 可以得到最小 PV 值对应的最佳参考球面波半径、顶点偏离量以及理论测量位置。结合以下定位方法, 可实现沿 Z 轴方向 0.001 mm 精度范围内的定位过程, 准确找到最佳参考球面波半径并定位至理论测量位置。

根据移动距离对 Zygo 干涉仪所采集干涉条纹的影响情况,以 0.01 mm 甚至更小的移动距离对其干涉条纹的级数影响较小,条纹级数基本变化不大;以 0.05 mm 的移动距离对其干涉条纹的级数影响较大,故本方法先以 0.05 mm 尺度作为移动距离找到了干涉条纹级数与仿真条纹一致的位置。在进一步缩小步距时,为了更高效地获得所需要的 Z 值位置,先以 0.01 mm 尺度作为移动距离找到最小 PV 值对应的位置后,再进一步缩小尺度,以 0.001 mm 尺度作为移动距离找到最终的最小 PV 值对应位置。

具体的定位方法步骤为:

1) 理论计算

根据非球面参数计算最小 PV 值对应的最佳参考球面波半径 R_c 和最佳参考球面波顶点偏离量 Δ_c , 可得到最小 PV 值对应的理论测量位置 $S = R_c + \Delta_c$ 。

2) 猫眼初定位

在 align 模式下,通过五维调整平台和精密滑轨,前后移动非球面,观察并使反射回干涉仪的光点与黑色固定十字线对准,肉眼找到光点最小的位置,置零光栅尺显示器。

3) 移动至推导得到的理论测量位置

移动非球面至推导得到的理论测量位置 S , 并记录此位置下光栅尺显示器的值;观察干涉条纹是否与仿真条纹级数一致,若一致,则直接跳到步骤 4) 或 5); 若不一致,则继续以下步骤。

4) 以 0.05 mm 为步距搜寻与仿真条纹一致的位置

以 0.05 mm 为步距移动非球面,直到找到干涉条纹是否与仿真条纹级数一致的位置,记录此位置下光栅尺显示器的值。

5) 以 0.01 mm 为步距搜寻最小 PV 值对应的位置

以 0.01 mm 为步距移动非球面,依次使用 Zygo 干涉仪测量面型结果,找到最小 PV 值对应下的位置,记录此位置下光栅尺显示器的值,并保证干涉条纹始终与仿真条纹级数一致。

6) 以 0.001 mm 为步距搜寻最小 PV 值对应的位置

以 0.001 mm 为步距移动非球面,依次使用 Zygo 干涉仪测量面型结果,找到最小 PV 值对应下的位置,记录此位置下光栅尺显示器的值,得到最小 PV 值对应的实测位置,即干涉仪使用半径为 R_c 的最佳参考球面波情况下的实测位置 S' , 则初定位猫眼位置和实际猫眼位置的差值为 $\Delta = |S' - S|$ 。

根据以上方法,能准确将被测非球面定位至理论测量位置,有效地降低由于定位误差造成的测量误差。另外,可使干涉仪产生的球面波前与计算的最佳参考球面波一致,通过叠加球面波方程和 Zygo 干涉仪的测量面型误差,重构出被测非球面面型的点云数据信息,其对基于 Zygo 干涉仪的面型拼接方法也具有重大意义。

3 实验验证

为验证定位方法的可行性和正确性,搭建了基于 Zygo 干涉仪的非球面测量平台,对一个直径为 108 mm 的非球面镜进行了实验验证。基于 Zygo 干涉仪的非球面测量平台的主要器件包括:隔振气浮台、Zygo 干涉仪、五维精密调整架、精密导轨和光栅尺等,其具体光路布置如图 3 所示。



图3 基于 ZYGO 干涉仪的非球面测量平台

Fig. 3 Aspherical measurement platform based on ZYGO interferometer

实验中, Z 轴定位部分选用的是 Renishaw 公司 QUANTiC™ 系列的直线光栅及读数头,其分辨率为 0.1 μm ,在气浮平台上安装完成并进行标定后,其定位精度能达到 0.5 μm 以内,配合五维精密调整架,可满足本定位方法在 ± 0.001 mm 范围的移动需求。Zygo 干涉仪的型号为 GPI™ XP/D, CDD 像素尺寸为 640×480, 波长为 632.8 nm, 口径为 4 英寸, 测量精度 $PV \leq \lambda/100$, 重复性测量精度 $PV \leq \lambda/300$ 、 $RMS \leq \lambda/10000$, 选用 F/3.3 型号的标准球面镜头,用于本实验中非球面的测量。

实验选用了口径 $D = 108$ mm, 顶点曲率半径 $R_0 = 348.6$ mm, 二次项系数 $K = -0.266 039$ 的凹面椭球面。受干涉仪标准镜头限制,为了避免非球面测量时的边缘失真影响,本实验选取该非球面的 90% 口径作为测量对象。

1) 理论计算: 根据理论模型推导计算, 得到最小 PV 值对应的最佳参考球面波半径 $R_c = 349.157$ mm, 顶点偏离量 $\Delta_c = 0.001 7$ mm, 以及理论测量位置为 $S = 349.159$ mm。

2) 猫眼初定位: 在 Align 模式下, 通过五维调整平台和精密滑轨, 前后移动非球面, 观察并使反射回干涉仪的光点与黑色固定十字线对准, 肉眼找到光点最小的位置 C, 如图 4(c) 所示, 置零光栅尺显示器。

3) 移动至推导得到的理论测量位置: 基于 MATLAB 仿真理想非球面与最佳参考球面发生干涉, 产生的理想干涉条纹如图 5(a) 所示; 移动非球面至推导得到的理论

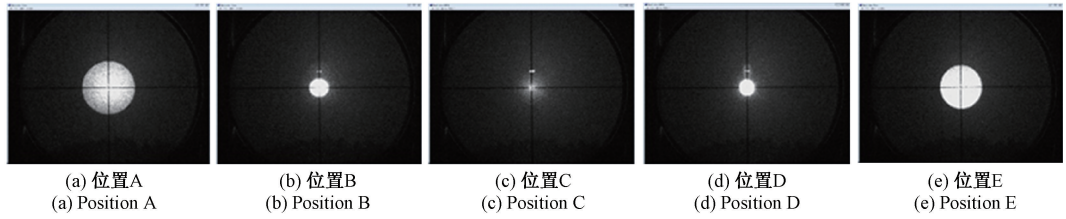


图 4 Align 模式下猫眼位置初定位过程

Fig. 4 Initial positioning process of the cat's eye position in Align mode

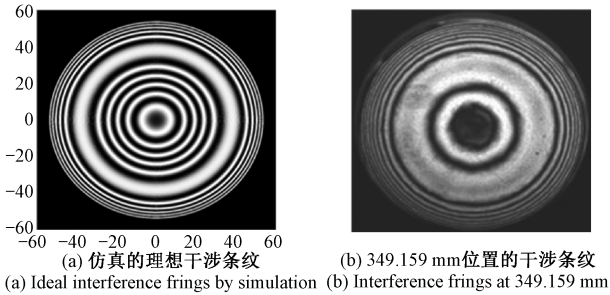


图 5 仿真及初始位置实际干涉图

Fig. 5 Simulation and actual interferogram of initial position

测量位置 $S = 349.159 \text{ mm}$, 使用 Zygo 干涉仪测量, 其干涉条纹如图 5(b) 所示。可以看出, 该位置的实测干涉条纹级数与仿真结果有较大差异, 说明初始位置在 Z 轴定位上有较大偏差, 需要进行精确的定位。

4) 以 0.05 mm 为步距搜寻与仿真条纹级数一致的位置: 以 349.159 mm 为基准和 0.05 mm 为步距移动非球面, 依次使用 Zygo 干涉仪测量, 其干涉条纹如图 6 所示, 测量位置分别为 (a) 349.109 mm 、(b) 349.159 mm 、(c) 349.209 mm 、(d) 349.259 mm 、(e) 349.309 mm 、(f) 349.359 mm 、(g) 349.409 mm 、(h) 349.459 mm 。可以看出, 在图 6 (g), 即 349.409 mm 处干涉条纹级数与 MATLAB 仿真的理想干涉条纹图 5(a) 一致。

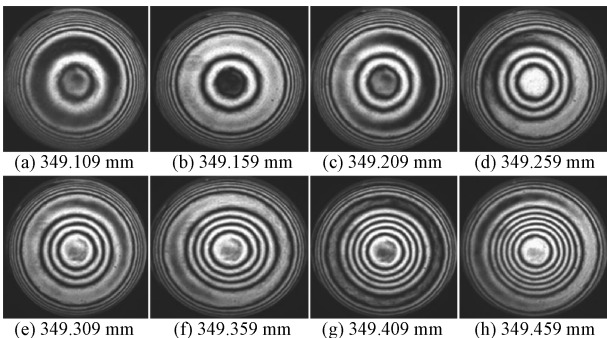


图 6 在初始位置以 0.05 mm 为步距时的实测干涉图

Fig. 6 Measured interferogram within 0.05 mm step length of the initial position

5) 以 0.01 mm 为步距搜寻最小 PV 值对应的位置: 以 349.409 mm 为基准和 0.01 mm 为步距移动非球面, 即分别在 349.399 、 349.409 、 349.419 、 349.429 、 349.439 、 349.449 、 349.459 mm 位置, 依次使用 Zygo 干涉仪进行测量。结果显示, 在 349.399 、 349.459 mm 的干涉条纹级数已超出要求, 与仿真条纹不一致, 在 349.409 mm 处 PV 值最小, 其测量结果如表 1 和图 7 所示。

表 1 以 0.01 mm 和 0.001 mm 为尺度搜寻位置测量结果对比

Table 1 Comparison of search position measurement results on a scale of 0.01 mm and 0.001 mm

测量位置 (以 0.01 mm 为步距)	PV/ λ	测量位置 (以 0.001 mm 为步距)	PV/ λ
349.399	2.479	349.408	2.597
349.409	2.662	349.409	2.662
349.419	2.705	349.410	2.536
349.429	2.920	349.411	2.574
349.439	3.019	349.412	2.578
349.449	3.091	349.413	2.590
349.459	3.306	349.414	2.616
		349.415	2.644
		349.416	2.671
		349.417	2.684
		349.418	2.695

表 1 中浅灰项表示干涉条纹级数与仿真条纹不一致, 深灰项表示此处 PV 值最小。故在测量结果下, 仍以 349.409 mm 为基准, 以 0.001 mm 为步距进行搜寻工作。

6) 以 0.001 mm 为步距搜寻最小 PV 值对应的位置: 以 349.409 mm 为基准和 0.001 mm 为步距移动非球面, 分别在 349.408 、 349.409 、 349.410 、 349.411 、 349.412 、 349.413 、 349.414 、 349.415 、 349.416 、 349.417 、 349.418 mm 位置, 依次使用 Zygo 干涉仪进行测量。结果显示, 除 349.408 mm 位置的干涉条纹级数超出要求, 其余所有位置的干涉条纹级数均与仿真条纹一致, 并且在 349.410

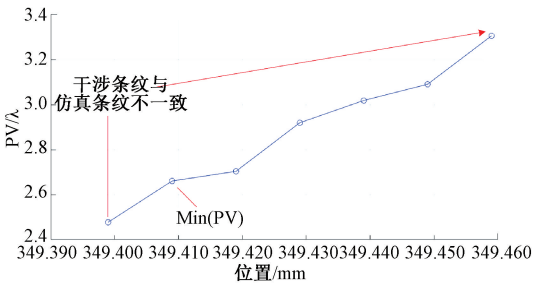


图7 以0.01 mm步距移动时的Zygo干涉仪测量结果

Fig. 7 Zygo interferometer measurements in the step length of 0.01 mm

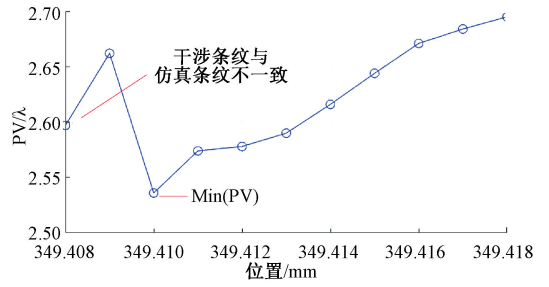


图8 以0.001 mm步距移动时的Zygo干涉仪测量结果

Fig. 8 Zygo interferometer measurements in the step length of 0.001 mm

mm处PV值最小,其测量结果如图8所示。因此,349.410 mm即为最小PV值所对应的理论测量位置。

由于Zygo干涉仪测量结果中包含了面型误差、波前误差以及调整误差,需将波前误差和调整误差进行分离。为了验证本方法的效果及其结果的准确性,我们同时计算了初始位置349.159 mm和最终定位的位置349.410 mm的面形结果,并分别计算了去除波前误差和去除调整误差后的峰谷值(peak to valley, PV)和均方根分别(root mean square, RMS),如表2和图9所示。从中可看出,初始位置349.159 mm的结果中含有

较大的装调误差,主要原因是由于该位置并不是理想测量位置,与计算得到的球面波叠加会对结果造成较大的影响。最终定位位置349.410 mm结果含有的装调误差较小,在去除波前误差和调整误差之后,其结果为PV=0.245λ,RMS=0.034λ,相比于初始位置的结果仍有降低。

为了验证本方法所寻找最终Z轴位置的正确性,以计算得到的最小PV值对应的最佳参考球面波半径R=349.157 mm所形成的球面波,叠加原始Zygo数据,再减去非球面面型,从而得到点云验证结果,如表2所

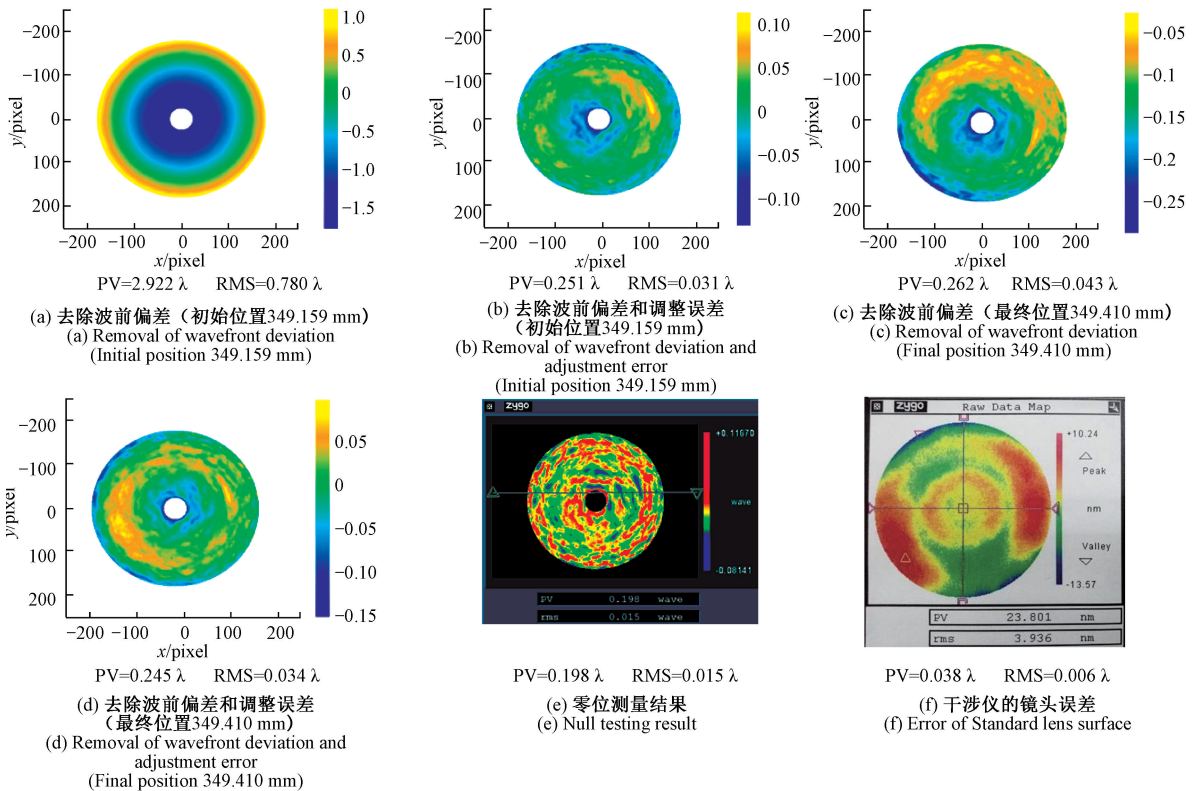


图9 面型结果对比图

Fig. 9 Comparison of error maps

表 2 初始位置、最终位置和零位检测结果对比

Table 2 Comparison of the results of initial position, final position and zero position detection

测量位置/mm	原始 Zygo 数据的处理结果		点云验证的结果		
	PV/ λ	RMS/ λ	PV/ λ	RMS/ λ	
349.159	去除波前偏差	2.922	0.780	2.916	0.779
	去除波前偏差和调整误差	0.251	0.031	0.264	0.048
349.410	去除波前偏差	0.262	0.043	0.261	0.044
	去除波前偏差和调整误差	0.245	0.034	0.248	0.035
零位测量结果:		PV=0.198 λ		RMS=0.015 λ	

示。这里为了更加直观地表示,将最终定位位置 349.410 mm 的点云处理过程及测量结果在图 10 中展示。可以看出,点云验证结果图 10(d)与原始 Zygo 数据处理结果图 10(e)非常接近,验证了本文理论建模和定位方法的正确性。

为了进一步验证结果,与该非球面的零位测量结果作比较,去除相同口径的中心小孔面形数据,三者面形结果对比如表 2 所示,零位检测结果为 PV = 0.198 λ , RMS=0.015 λ ,如图 9 所示。将最终定位位置 349.410 mm 结果与其进行比较,PV 值残差为 0.047 λ ,RMS 残差为 0.019 λ 。实验中所用 Zygo 干涉仪的标准镜头的面形误差为 PV=0.038 λ ,RMS=0.006 λ ,残差值与标准镜头的面形误差处于同一水平,进一步证明了所提出方法的正确性。

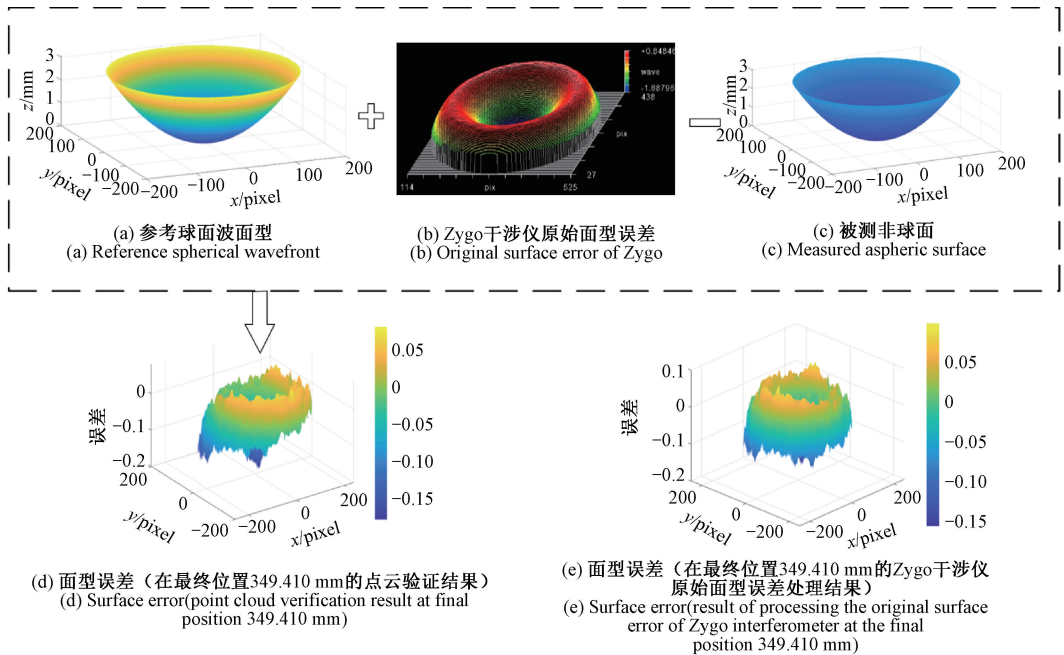


图 10 349.410 mm 位置的点云处理过程及测量结果对比

Fig. 10 Point cloud processing process and comparison of measurement results at 349.410 mm

4 结 论

本文提出了一种基于最小 PV 值的非球面测量 Z 轴定位方法,实现了沿 Z 轴方向 0.001 mm 精度的准确定位,有效地降低了由于定位误差所造成的测量误差。文中分析了非球面与参考球面波的理论模型,推导出了最小 PV 值对应的最佳参考球面波半径、顶点偏离量以及理论测量位置,在此基础上完成了沿 Z 轴方向 0.001 mm 精度范围内的定位过程。该方法可以准确定位至理论测

量位置,有效地降低由于定位误差造成的测量误差;可获得参考球面波半径等信息,对于基于 Zygo 干涉仪的面型点云重构和拼接方法等方面的研究也具有重要意义。实验结果表明,定位后的结果与最佳参考球面波的点云数据计算结果进行对比,结果接近,证明了定位方法的正确性;并与零位检测结果相比,PV 值残差为 0.047 λ ,RMS 残差为 0.019 λ ,进一步证明该定位方法的准确性。另外,针对精度比微米级更高的 Z 轴定位,可用于测量精度要求为 $\lambda/100$ 及更高的干涉测量中,具体需根据实际的测量需求和成本方面进行综合考虑。

参考文献

- [1] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1):26-46.
SHI T, YANG Y Y, ZHANG L, et al. Surface testing methods of aspheric optical element[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.
- [2] 付翔宇, 王道档, 吴振东, 等. 用于在线检测的紧凑型瞬态干涉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):78-84.
FU X Y, WANG D D, WU ZH D, et al. Compact transient interferometric measurement system used for online testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(2):78-84.
- [3] AREZKI Y, NOUIRA H, ANWER N, et al. A novel hybrid trust region minimax fitting algorithm for accurate dimensional metrology of aspherical shapes [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2018,127:134-140.
- [4] FENG Y, CHENG H, TAM H. Mapping error correction of large off-axis aspheric surface in null test[J]. Optik (Stuttgart), 2015,126(24):5825-5829.
- [5] 杜康, 刘春雨, 谢运强, 等. 基于非球面的大相对孔径微型星敏感器镜头设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6):96-103.
DU K, LIU CH Y, XIE Y Q, et al. Lens design of micro star sensor with large aperture based on aspheric surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(6):96-103.
- [6] YAN F, FAN B, HOU X, et al. Measurement of large convex hyperbolic mirrors using hindle and stitching methods[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7):856-860.
- [7] 莫卫东, 范琦, 贾晋超, 等. 非球面检测中最佳入射球面波和最佳参考球面波的确定[J]. 中国光学, 2012,5(3):263-269.
MO W D, FAN Q, JIA J CH, et al. Determination of optimum positions of incident spherical wave and reference spherical wave in testing aspheric surface [J]. Chinese Optics, 2012,5(3):263-269.
- [8] 李俊峰. 非球面度梯度均方根法确定最佳比较球面及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1550-1556.
LI J F. Calculation and application of the best-fit sphere in root mean square of the gradient of the asphericity method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(10):1550-1556.
- [9] 李兵, 刘晓, 康晓清, 等. 环形子孔径拼接检测的中心偏移误差补偿[J]. 光子学报, 2016,45(9):93-98.
LI B, LIU X, KANG X Q, et al. Compensation for center offset error in annular subaperture stitching interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2016,45(9): 93-98.
- [10] 王起维, 董申, 孙涛, 等. 非球面非零位横向剪切干涉检测与波前重建[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(3):261-270.
WANG Q W, DONG SH, SUN T, et al. Non-null lateral shearing interferometric testing of aspheric surface and wavefront reconstruction [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013,11(3):261-270.
- [11] YI L, ZHANG X, HU H, et al. Equivalent thin-plate method for stressed mirror polishing of an off-axis aspheric silicon carbide lightweight mirror [J]. Optics Express, 2020,28(24):36413-36431.
- [12] 王孝坤. 大口径离轴凸非球面系统拼接检验技术[J]. 中国光学, 2016,9(1):130-136.
WANG X K. Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method[J]. Chinese Optics, 2016,9(1):130-136.
- [13] CHEFFOT A L, VIGAN A, LEVEQUE S, et al. Measuring the cophasing state of a segmented mirror with a wavelength sweep and a Zernike phase contrast sensor[J]. Opt Express, 2020,28(9):12566-12587.
- [14] MACMARTIN D G, THOMPSON P M, COLAVITA M M, et al. Dynamic analysis of the actively-controlled segmented mirror of the thirty meter telescope[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 58-68.
- [15] 李玉霞, 刘昌华, 王建立, 等. 大型望远镜主镜位姿解算与监测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(5):766-774.
LI Y X, LIU CH H, WANG J L, et al. Design of large telescope primary mirror position resolving and monitoring system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(5):766-774.
- [16] 单博闻, 辛宏伟, 陈长征. 空间太阳望远镜调焦机构的设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(6):1-8.
SHAN B W, XIN H W, CHEN CH ZH, et al. Design and analysis for focusing mechanism of space solar

telescope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6):1-8.

- [17] 陈佳夷, 王聪, 霍腾飞, 等. 激光跟踪仪检测大口径非球面方法研究[J]. 应用光学, 2021, 42(2):299-303.
CHEN J Y, WANG C, HUO T F, et al. Research on detection method of large-aperture aspheric surface by laser tracker [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(2):299-303.
- [18] 王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, 41(4):379-383.
WANG X K. Measurement of aspherical surface by laser tracker [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(4):379-383.
- [19] 王孝坤. 利用三坐标测量仪拼接检测大口径非球面面形[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10):3410-3415.
WANG X K. Measurement of large aspheric surface by stitching and coordinate measuring machine[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10):3410-3415.
- [20] CHEN W, CHEN S, ZHAI D. Coordinate stitching measurement of highly steep freeform surfaces [J]. Measurement science & technology, 2020, 32(2).

作者简介



兰梦辉, 2014年于华中农业大学获得学士学位, 2017年于西安交通大学获得硕士学位, 2017年—2020年于航空工业任工程师, 2020至今为西安交通大学在读博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术、大尺寸复杂表面检测等。

E-mail: lan15837568334@stu.xjtu.edu.cn

Lan Menghui received his B. Sc. degree from Huazhong Agricultural University in 2014, and received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. He worked as an engineer at AVIC from 2017 to 2020, and has been a Ph. D. student at Xi'an Jiaotong University since 2020. His main research interests include precision testing technology, large-size complex surface inspection, etc.



李兵, 分别在1988年、1991年和2004年于西安交通大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为精密测试技术、无损检测、大尺寸复杂表面检测等。

E-mail: lb@xjtu.edu.cn

Li Bing received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Xi'an Jiaotong University in 1988, 1991, and 2004, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision test technology, nondestructive testing and large scale complex surface inspection, etc.



魏翔(通信作者), 2012年于四川大学获得学士学位, 2018年于西安交通大学获得博士学位, 2018至今为西安交通大学助理教授, 主要研究方向为精密测试技术、大尺寸复杂表面检测等。

E-mail: hill_wx@xjtu.edu.cn

Wei Xiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Sichuan University in 2012, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2018. He has been an assistant professor at Xi'an Jiaotong University since 2018. His main research interests in precision testing technology and large-size complex surface inspection etc.