

文章编号 1004-924X(2015)10-2794-09

## 微球表面形貌检测中的偏心误差分析与修正

卢丙辉, 刘国栋\*, 孙和义, 刘炳国, 陈凤东

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 由于使用传统的误差修正方法进行微球形貌检测会有过大的残差, 本文提出了一种新的偏心误差修正方法来提高微球表面形貌检测的精度和效率。在分析了横向偏心和轴向偏心引入光程差数学模型的基础上, 推导了偏心误差的高阶近似模型, 提出了小曲率半径下基于 Zernike 多项式拟合的偏心误差修正方法, 并给出误差修正的流程及相关参数的标定方法。通过对 2 mm 直径的微球的表面形貌检测验证了所提出误差修正方法的可行性和有效性。结果表明: 相对于零条纹时的形貌误差基准, 采用本文提出的方法修正后的残余形貌误差峰谷(PV)值为  $0.0815\lambda$ , 均方根(RMS)值为  $0.0161\lambda$ , 比传统方法修正效果更好, 能够满足高精度微球形貌检测的需求。

**关键词:** 表面形貌检测; 微球; 偏心误差; Zernike 多项式拟合

**中图分类号:** TH703; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2794

## Analysis and correction of eccentricity errors in microsphere surface inspection

LU Bing-hui, LIU Guo-dong\*, SUN He-yi, LIU Bing-guo, CHEN Feng-dong

(School of Electrical Engineering and Automation,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: lgd@hit.edu.cn

**Abstract:** When traditional error correction methods are used in microsphere surface inspection, it might show a larger residual. Therefore, this paper proposes a surface topography to correct the eccentricity of microsphere and to improve the measuring precision and efficiency. Based on the analysis of mathematic model of optical path difference introduced by the lateral and axial eccentricities, the high-order approximation model of eccentricity error was deduced. A eccentricity correction method for small sphere curvature radius was proposed on the basis of Zernike polynomials fitting. The correction flow was provided for illustrating the detail, and the corresponding calibration method of relative parameters was given. An experiment for the surface topography of a microsphere with a diameter of 2 mm was performed to verify the feasibility and effectiveness of the correction method. The experimental results relative to the standard profile data indicate that the proposed correction method offers the surface errors (peak-valley (PV) and root-mean-square (RMS) values) to be  $0.0815\lambda$  and  $0.0161\lambda$ , respectively, which are more excellent than that of the traditional methods. The method is

**收稿日期:** 2015-04-16; **修订日期:** 2015-05-16.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 61275096, No. 51275120); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(No. HIT.NSRIF201098)

able to meet the demand of high precise inspection of microspheres.

**Key words:** surface topographic inspection; microsphere; eccentricity error; Zernike polynomial fitting

## 1 引言

随着微纳米加工技术的不断进步,微小球体作为最常用的元器件之一,在微机械、微光学、惯性约束聚变(ICF)<sup>[1]</sup>等领域有着广泛的应用。微小球体的表面形貌精度直接影响其使用性能,所以有必要研究相应的高精度检测手段。光学干涉测量法具有高精度、高效率、非接触等优点,尤其是近年来点衍射干涉术<sup>[2-3]</sup>(PDI)和移相干涉技术<sup>[4]</sup>(PSI)的提出与发展,进一步提高了干涉仪的测量精度,因此光学干涉法成为了微小球面高精度检测的理想方法<sup>[5]</sup>。

在微球表面形貌的检测过程中,由于受器件自身精度及装校误差的限制,球心往往偏离探测光束的会聚中心,产生偏心误差。虽然采用将干涉图调至零条纹的方法可以降低偏心误差的影响<sup>[6]</sup>,但这不仅限制了干涉仪的动态响应范围,降低了检测效率,而且还需要极高的机械运动精度。此外,当面型误差较大时,即使球心与光束中心重合,也仍可能产生一定数量的条纹,难以判断两者是否已经对心。因此,高精度、高效率的检测允许存在一定范围的偏心误差,但误差需要进行有效修正。

传统的球面检测调整误差校正基于光程差的低阶近似模型,仅消去 Zernike 多项式<sup>[7]</sup>中的常数项、倾斜项和离焦项,而忽略了引入的高阶像差项。虽然通常情况下这种近似处理是可行的,但随着待测球面曲率半径的减小,修正后的残差逐渐增大,无法满足高精度球面检测的需求。本文研究了微球表面形貌检测的偏心误差修正方法,分析推导了偏心引入光程差的数学模型,给出了

具体的修正方法及相关参数的标定方法,最后通过实验验证了该方法的可行性和有效性。

## 2 误差模型分析

### 2.1 横向偏心误差模型

在采用 Zernike 多项式拟合法进行偏心误差修正时,需要将误差模型分解为 Zernike 多项式中的误差项,从而确定哪些分量由偏心误差引入,而这些分量需要从原始形貌数据中剔除。在不考虑光束回程差的前提下,偏心误差可分为横向偏心和轴向偏心(离焦)两种情况。

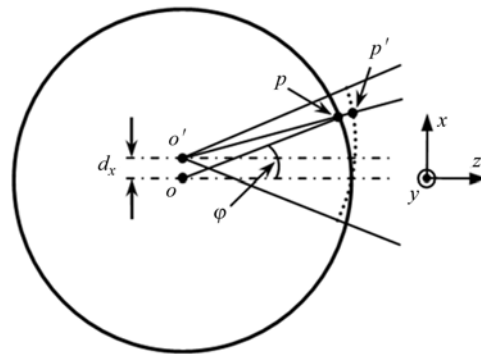


图 1 横向偏心模型

Fig. 1 Model of lateral eccentricity

图 1 中以  $x$  向偏心为代表进行说明。其中,虚线为参考波面; $p$  为被测球面上的任意点; $o$  为球心; $o'$  为光束会聚中心; $d$  为偏心量; $\varphi$  为  $p$  点对应的孔径角; $p'$  为  $p$  在参考波面上的对应点。根据图 1 中的几何关系,可以得到  $p$  点对应的光程差为:

$$OPD_x = 2(|o'p'| - |o'p|) = 2[\sqrt{R^2 + d_x^2} - \sqrt{(x - d_x)^2 + y^2 + z^2}] = 2R[\sqrt{1 + \delta_x^2} - \sqrt{1 + \delta_x^2 - 2\delta_x v}], \quad (1)$$

其中: $R$  为待检球面的曲率半径; $x, y, z$  分别为  $p$  点在直角坐标系下的坐标; $\delta_x = d_x/R$ ;  $v = \sin \varphi \cdot \cos \theta$ ;  $\theta$  为球坐标下的方位角。传统的修正方法取级数一阶近似展开,整理得到:

$$OPD_x = 2d_x \sin \varphi \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

式(2)中  $\sin \varphi$  可以表示为有效检测数值孔径 NA 与归一化极径  $\rho$  的乘积<sup>[8]</sup>,即  $\sin \varphi = NA \cdot \rho$ ,所以式(2)变为:

$$OPD_x = 2d_x NA \cdot \rho \cos \theta = a_1 \cdot Z_1, \quad (3)$$

其中:  $Z_1 = \rho \cdot \cos \theta$ , 为多项式中  $x$  轴倾斜项, 其系数  $a_1 = 2d_x \cdot NA$ , 干涉图呈现纵向的直条纹。当  $d_x \ll R$ , 即  $\delta_x$  为极小量时, 式(3)的近似计算可认为是准确的; 但随着  $R$  的减小, 当  $R$  接近亚毫米量级时, 如此近似便会产生较大的残差。图 2 为公式(3)计算横向偏心误差时的残差 PV 值曲线。可以看出, 当待检球面曲率半径为  $500 \mu\text{m}$ , 偏心量为  $15 \mu\text{m}$  时, 光程差残差的 PV 值已接近  $70 \text{ nm}$ , 这将严重影响检测精度。其根本原因在于数学模型在近似展开过程中,  $\delta_x$  并不是一个极小值, 舍去其高阶展开项必然产生很大的残差, 因此对式(1)采用级数二阶近似展开, 即:

$$OPD_x = 2R \left\{ \left[ 1 + \frac{\delta_x^2}{2} - \frac{\delta_x^4}{8} \right] - \left[ 1 + \frac{\delta_x^2 - 2\delta_x v}{2} - \frac{(\delta_x^2 - 2\delta_x v)^2}{8} \right] \right\}, \quad (4)$$

化简整理得到:

$$OPD_x = R(2\delta_x - \delta_x^3) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta + R\delta_x^3 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \theta. \quad (5)$$

以二倍角表示  $\cos^2 \theta$ , 并略去常数项, 整理得到:

$$\begin{aligned} OPD_x &= R(2\delta_x - \delta_x^3) NA \cdot \rho \cos \theta + (R\delta_x^3)/2 \cdot \\ & NA^2 \cdot \rho^2 \cos(2\theta) + (R\delta_x^3 NA^2 \cdot \rho^2)/2 = \\ & a_1 \cdot Z_1 + a_{4x} \cdot Z_4 + a_{3x} \cdot Z_3, \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $Z_1, Z_3, Z_4$  分别为 Zernike 多项式中的  $x$  轴倾斜项、离焦项和像散项; 其系数分别为:

$$\begin{cases} a_1 = R(2\delta_x - \delta_x^3) NA \\ a_{3x} = (R\delta_x^3 NA^2)/4 \\ a_{4x} = (R\delta_x^3 NA^2)/2 \end{cases} \quad (7)$$

取二阶近似时, 残差 PV 值曲线如图 3 所示。此时最大值小于  $0.8 \text{ nm}$ , 可以认为式(6)表达的偏心误差已足够准确。由此可见,  $x$  向偏心引入的误差除  $x$  轴倾斜外, 还包含了离焦和像散。

同理可以得到由  $y$  轴方向偏心量  $d_y$  引入的误差模型为:

$$\begin{aligned} OPD_y &= R(2\delta_y - \delta_y^3) NA \cdot \rho \sin \theta - (R\delta_y^3)/2 \cdot \\ & NA^2 \cdot \rho^2 \cos(2\theta) + (R\delta_y^3 NA^2 \cdot \rho^2)/2 = \\ & a_2 \cdot Z_2 + a_{4y} \cdot Z_4 + a_{3y} \cdot Z_3, \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $\delta_y = d_y/R$ ,  $Z_2$  为  $y$  轴倾斜项。可见, 除  $y$  轴倾斜外, 横向偏差也引入了离焦和像散。各项系

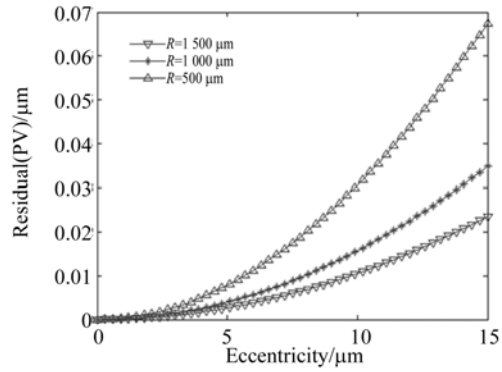


图 2 横向偏心取一阶近似后的残差 PV 值  
Fig. 2 Residual PV values of lateral eccentricity after first-order approximation

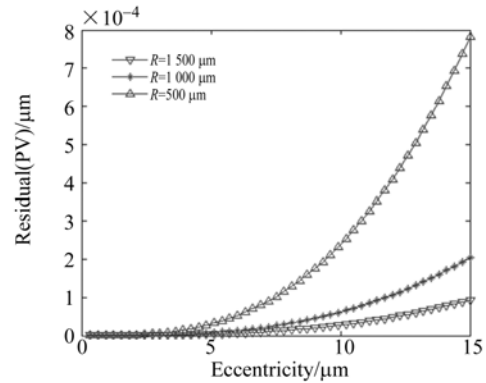


图 3 横向偏心取二阶近似后的残差 PV 值  
Fig. 3 Residual PV values of lateral eccentricity after second-order approximation

数分别为:

$$\begin{cases} a_2 = R(2\delta_y - \delta_y^3) NA \\ a_{3y} = (R\delta_y^3 NA^2)/4 \\ a_{4y} = -(R\delta_y^3 NA^2)/2 \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 轴向偏心误差模型

轴向偏心模型如图 4 所示。根据图中的几何关系可以得到球面上任意一点  $p$  对应的光程差为:

$$\begin{aligned} OPD_z &= 2(|o'p'| - |o'p|) = \\ & 2 \left[ (R + d_z) - \sqrt{x^2 + y^2 + (z + d_z)^2} \right] = \\ & 2R \cdot \left[ (1 + \delta_z) - \sqrt{1 + \delta_z^2 + 2\delta_z u} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

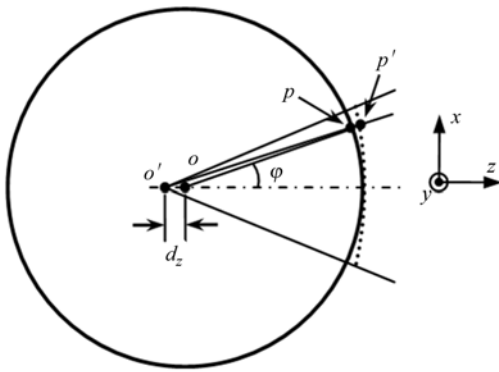


图 4 轴向偏心模型

Fig. 4 Model of axial eccentricity

其中:  $\delta_z = d_z/R$ ,  $u = \cos \varphi$ 。同样按级数一阶近似展开,结果如式(11)所示,其残差 PV 值曲线如图 5 所示。

$$OPD_z = 2d_z \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (11)$$

$$OPD_z = 2R \cdot \left\{ 1 + \delta_z - \left[ 1 + \frac{\delta_z^2 + 2\delta_z u}{2} - \frac{(\delta_z^2 + 2\delta_z u)^2}{8} + \frac{(\delta_z^2 + 2\delta_z u)^3}{16} \right] \right\} \quad (12)$$

化简整理,并略去  $\delta_z^4$  以上的高阶项,得到:

$$OPD_z = R \cdot [2\delta_z(1 - \cos \varphi) + (\delta_z^3 - \delta_z^2)\sin^2 \varphi] \quad (13)$$

式(13)对应的残差 PV 值如图 6 所示,最大值小于 0.25 nm。

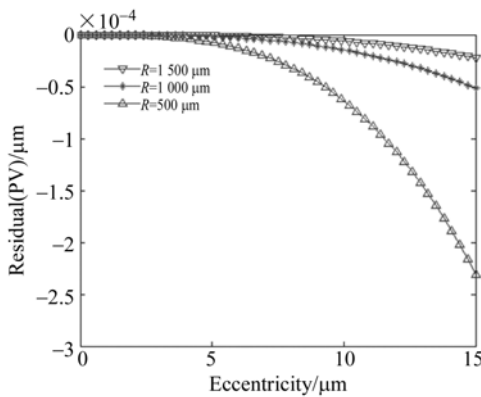


图 6 轴向偏心取三阶近似后的残差 PV 值

Fig. 6 Residual PV values of axial eccentricity after third-order approximation

式(13)中  $\cos \varphi$  要以  $\sin \varphi$  的形式表述,需要再次近似。通常情况下取三阶近似便足够精确,即:

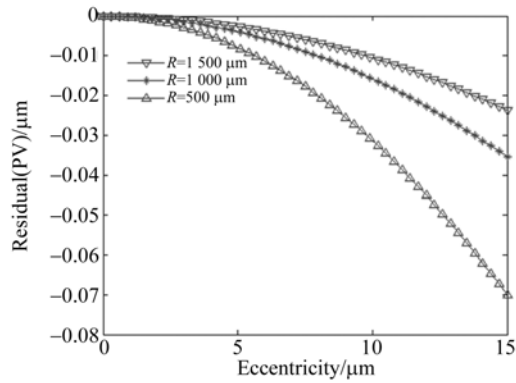


图 5 轴向偏心取一阶近似后的残差 PV 值

Fig. 5 Residual PV value of axial eccentricity after first-order approximation

此时,残差 PV 的最大值已超过 70 nm。取二阶近似时,残差仍接近 30 nm。所以取三阶近似,即有:

$$1 - \cos \varphi = 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = \frac{NA^2 \rho^2}{2} + \frac{NA^4 \rho^4}{8} + \frac{NA^6 \rho^6}{16} \quad (14)$$

带入式(13)中得到:

$$OPD_z = R[(\delta_z - \delta_z^2 + \delta_z^3) \cdot NA^2 \cdot \rho^2 + (\delta_z/4) \cdot NA^4 \cdot \rho^4 + (\delta_z/8) \cdot NA^6 \cdot \rho^6] \quad (15)$$

轴向偏心两次近似后的残差 PV 值曲线如图 7 所示,最大值小于 0.9 nm,式(15)的近似计算较为准确。

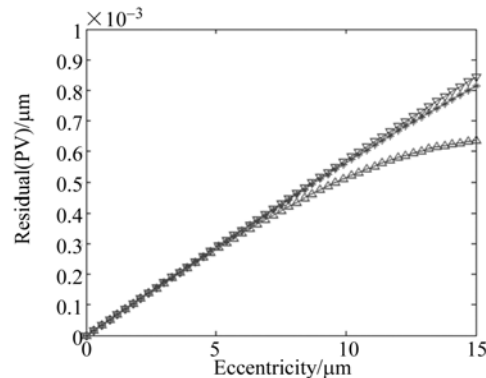


图 7 余弦近似后的残差 PV 值

Fig. 7 Residual PV values after cosine approximation

由 Zernike 多项式  $Z_3, Z_8, Z_{15}$  的表达式可反推得到:

$$\begin{cases} \rho^2 = (Z_3 + 1)/2 \\ \rho^4 = (Z_8 + 3Z_3 + 2)/6 \\ \rho^6 = (Z_{15} + 5Z_8 + 9Z_3 + 5)/20 \end{cases}, \quad (16)$$

将式(16)带入式(15)中,整理并略去常数项得到:

$$OPD_z = a_{3z} \cdot Z_3 + a_8 \cdot Z_8 + a_{15} \cdot Z_{15}, \quad (17)$$

其中:

$$\begin{cases} a_{3z} = R \cdot [NA^2(\delta_z - \delta_z^2 + \delta_z^3)/2 + \delta_z NA^4/8 + 9\delta_z NA^6/160] \\ a_8 = R \cdot (\delta_z NA^4/24 + \delta_z NA^6/32) \\ a_{15} = (R\delta_z NA^6)/160 \end{cases}. \quad (18)$$

可见,轴向偏心引入的误差除离焦项外还包含了主球差和二阶球差。

### 3 误差修正与参数标定

#### 3.1 误差修正

通过上述分析可知,要实现准确的误差修正,除了消去 Zernike 多项式中的常数项、倾斜项和离焦项外,还需消去引入的像散项、主球差项和二阶球差项。其中,常数项、倾斜项和离焦项等低阶项的系数可以通过波面数据拟合直接获得,而其他高阶误差项有可能部分来自待检球面的固有误差,难以直接获得,需要单独计算并消去。

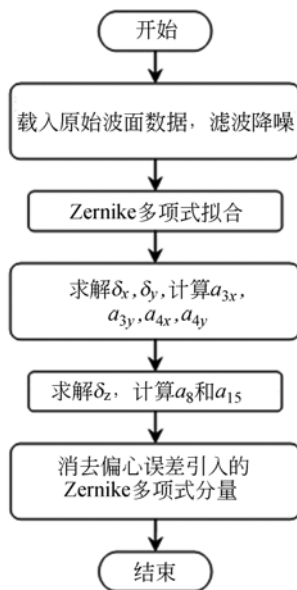


图 8 偏心误差修正流程

Fig. 8 Flow chart of eccentricity error correction

图 8 为本文提出的小曲率半径下偏心误差修正流程,参数  $R$  和  $NA$  已预先准确标定,可作为已知条件使用。修正的具体步骤为:

(1) 通过干涉仪系统测得含有对准误差的原始波面数据  $W^*$ , 并进行滤波降噪处理;

(2) 对原始波面数据  $W^*$  进行 Zernike 多项式拟合,得到多项式的常数项系数  $a_0$ 、 $x$  轴倾斜项系数  $a_1$ 、 $y$  轴倾斜项系数  $a_2$  以及离焦项系数  $a_3$ ;

(3) 将参数  $R$  和  $NA$ ,以及拟合出的系数  $a_1$ ,  $a_2$  代入式(7)和式(9),反算出  $\delta_x$  和  $\delta_y$ ,进而求出像散项系数  $a_4 = a_{4x} + a_{4y}$ ,以及倾斜引入的离焦项系数  $a_{3x}$  和  $a_{3y}$ ;

(4) 从  $a_3$  中减去  $a_{3x}$  和  $a_{3y}$ ,得到  $a_{3z}$ ,再根据式(18)中  $a_{3z}$  的表达式反算  $\delta_z$ ,进而求出  $a_8$  和  $a_{15}$ ;

(5) 消去  $W^*$  中的常数项、倾斜项、离焦项、像散项、主球差项和二阶球差项,得到待测球面实际的形貌数据  $W = W^* - \sum a_i Z_i - a_8 Z_8 - a_{15} Z_{15}$ ,其中  $i=0, 1, 2, 3, 4$ 。

#### 3.2 参数标定

为了满足偏心误差的修正需求,需要预先标定获得微球的半径  $R$  以及有效检测数值孔径  $NA$ 。此外,还需获得干涉场在图像采集器件(如 CCD)上的中心坐标,以用于波面拟合中极径的归一化。

半径  $R$  可借助于商品化的双频激光干涉仪辅助标定。由衍射干涉法球面检测的原理可知,当将待测球面分别置于对心位和猫眼位这两个“零条纹”的特殊位置时,调节机构沿光轴方向运动的距离即为球的半径。在球面上选取多个位置进行测量并求均值,可以降低球面变形及零条纹位置判定引入的随机误差影响。

受光路中各类光学器件边缘效应的影响,干涉场边缘处的条纹产生了明显的扭曲变形,如图 9 所示。变形区域的形貌特征严重失真,无法使用,所以实际的检测孔径  $NA$  要小于物镜的自身标称数值孔径,需要单独标定。

Zernike 多项式中的低阶项系数  $a_1, a_2, a_3$  可直接拟合获得,但  $a_3$  的组成较为复杂,且表达式中包含  $NA$  的高次方项,所以本文选取  $a_1$  标定参数  $NA$ 。首先,将双频激光干涉仪的测量方向调至与  $x$  轴同向,微球置于对心位置,拟合波面数据并反微调,直至  $a_1$  趋近于零,记录干涉仪读数

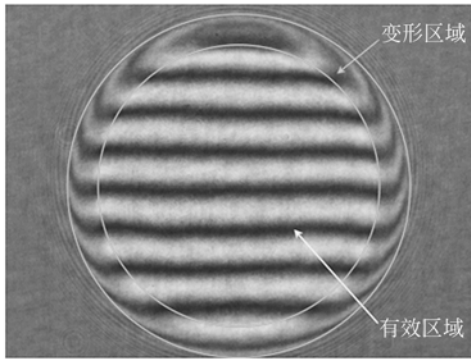


图 9 干涉场区域划分

Fig. 9 Division of interference field

$D_1$ 。然后,沿  $x$  轴运动  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,并拟合波面数据得到  $a_1$ ,并记录读数  $D_2$ 。最后,由式(19)计算出有效检测孔径 NA。

$$NA = \frac{a_1}{2(D_2 - D_1) - (D_2 - D_1)^3 / R^2} \quad (19)$$

此外,干涉场边缘的扭曲变形使得直接获取中心坐标变得十分困难。由式(17)和式(18)可以看出,仅存在轴向偏心误差时,波面的顶点必然位于干涉场中心;而球心横向偏移会造成波面顶点移动,在无法进行波面拟合的情况下,要完全消除横向偏移,仅凭目视判断难以满足标定精度的需求。因此,本文采用波面差分的标定方法,即在目视调整“零条纹”的位置分别引入正向和反向离焦,测得波面数据  $W_P$  和  $W_R$ ,得到差分波面  $W_\Delta = W_P - W_R$ 。倾斜项已由差分运算消除,仅存在离焦项和部分高阶球差项。阈值分割得到目标区域后,完全可以将高度(或相位)信息看作灰度信息来处理,带入图像处理中的灰度重心法公式中,计算出的质心即为干涉场中心,如式(20)所示:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} x \cdot W_\Delta(x,y)}{\sum_{(x,y) \in \Omega} W_\Delta(x,y)} \\ y_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} y \cdot W_\Delta(x,y)}{\sum_{(x,y) \in \Omega} W_\Delta(x,y)} \end{cases} \quad (20)$$

其中:  $(x, y)$  为像面坐标,  $\Omega$  为目标区域,  $(x_0, y_0)$  为干涉场的中心坐标。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 参数标定结果

微球表面形貌检测基于移相点衍射干涉原理,实验装置如图 10 所示。激光器的工作波长为

532 nm,额定功率为 330 mW 连续可调。双频激光干涉仪精度为  $\pm 1.1 \times 10^{-6}$ 。微球样品取自哈尔滨轴承厂生产的直径为 2 mm 的航空滚珠样品,军品级品质。实验采用五帧 Stoilov 算法<sup>[9-10]</sup>提取相位信息,并进行相位解包裹<sup>[11-12]</sup>。用于干涉场中心坐标标定的差分波面相位分布如图 11 所示,其顶点即为干涉场中心。全部参数的标定结果如表 1 所示。半径  $R$  的标定值为 1.003 mm,有效数值孔径 NA 的标定值为 0.379,干涉场的中心坐标为(494.0, 632.7)。

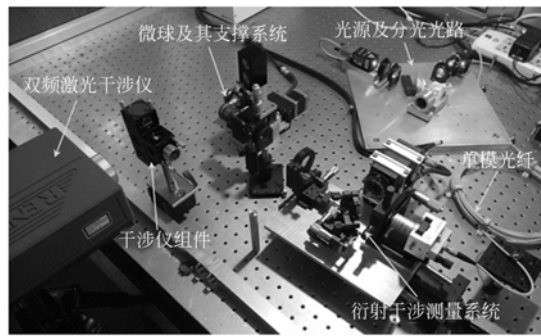


图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental devices

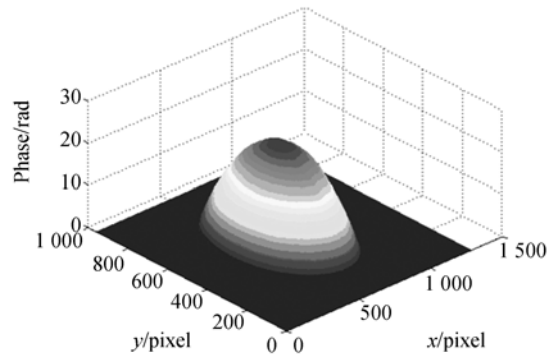


图 11 差分波面的相位分布

Fig. 11 Phase distribution of differential wave

表 1 参数标定结果

Tab. 1 Calibration results of parameters

| 标定次数 | 半径 R /mm | 有效孔径 NA | 中心坐标/pixel |       |
|------|----------|---------|------------|-------|
|      |          |         | $x_0$      | $y_0$ |
| 1    | 1.003    | 0.375   | 494.7      | 632.8 |
| 2    | 1.006    | 0.389   | 493.2      | 631.6 |
| 3    | 1.005    | 0.381   | 493.6      | 633.1 |
| 4    | 0.998    | 0.377   | 494.5      | 633.7 |
| 5    | 1.002    | 0.371   | 494.1      | 632.4 |
| 均值   | 1.003    | 0.379   | 494.0      | 632.7 |

### 4.2 实测结果

微球表面形貌测量实验采集的 5 帧干涉图如图 12 所示。移相步长取  $\pi/2$ ,干涉场边缘变形区域已从干涉图中直接去除。由于同时引入了横向偏心 and 轴向偏心,所以干涉条纹表现为宽度不一的弯曲条纹。

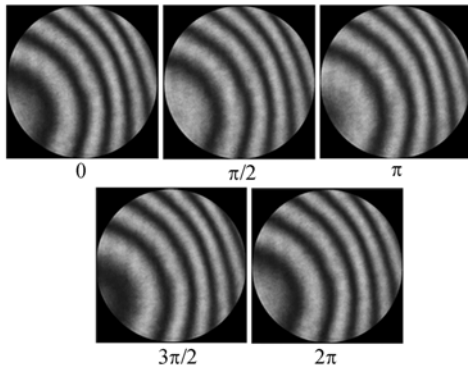


图 12 5 帧移相干涉图

Fig. 12 Interferograms by five step phase shifting

采用 Stoilov 算法提取相位信息后进行相位解包裹,再将连续的初始相位差分布换算为高度差,得到修正前的形貌误差分布,如图 13 所示。由于同时存在横向偏心和轴向偏心,修正前的形貌误差分布呈现倾斜的光滑曲面,细微的表面形貌波动被淹没其中。

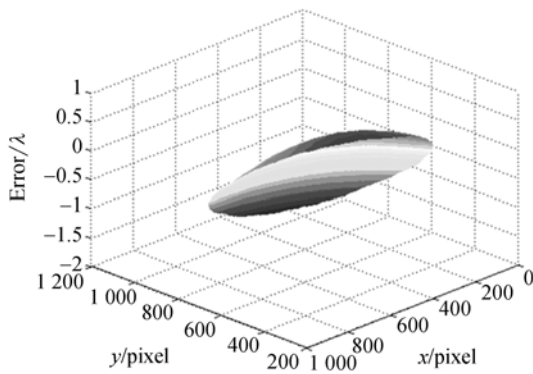
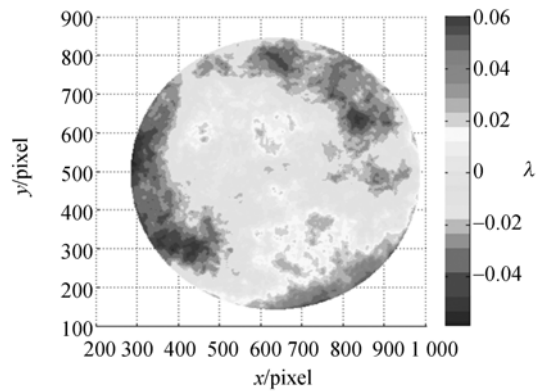


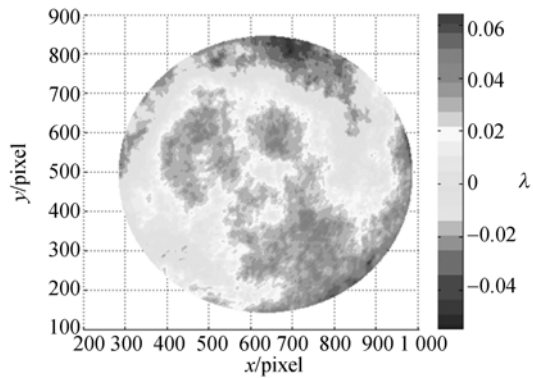
图 13 修正前的形貌误差

Fig. 13 Profile errors without correction

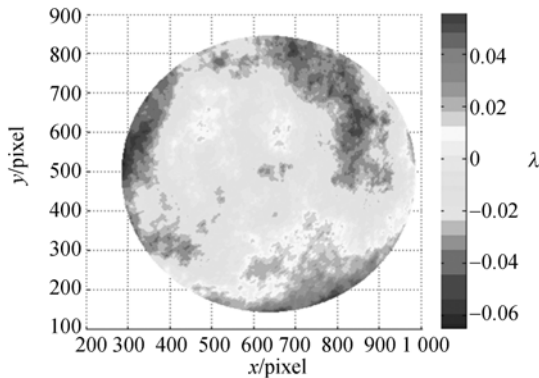
图 14 为修正后的形貌误差分布。其中,图 14(a)为调整至零条纹时的形貌误差,并以此作为形貌基准;14(b)为采用传统修正方法修正后的形貌误差;14(c)为采用本文提出方法修正后的形貌



(a) 零条纹时的形貌误差  
(a) Profile errors without fringe



(b) 传统方法修正后的形貌误差  
(b) Profile errors corrected by traditional method



(c) 本文提出方法修正后的形貌误差  
(c) Profile errors corrected by proposed method

图 14 修正后的形貌误差分布

Fig. 14 Distribution of corrected profile error

貌误差。从图中可以看出,图 14(c)与(a)更为接近。修正后的形貌误差 PV 值、RMS 值以及相对

于图 14(a)形貌基准的残余形貌误差 PV 值和 RMS 值如表 2 所示。在 2 mm 直径的微球表面形貌检测中,采用本文提出方法修正后的残余形貌误差的 PV 值仅为 0.081 5 $\lambda$ ,RMS 值为 0.016 1 $\lambda$ ,优于传统方法的修正效果。

表 2 被测表面形貌误差

Fig. 2 Profile errors of testing surface

| 测试项目    | 形貌误差/ $\lambda$ |         | 残余形貌误差/ $\lambda$ |         |
|---------|-----------------|---------|-------------------|---------|
|         | PV 值            | RMS 值   | PV 值              | RMS 值   |
| 零条纹基准   | 0.118 7         | 0.021 0 | —                 | —       |
| 传统修正方法  | 0.124 2         | 0.025 4 | 0.107 3           | 0.019 4 |
| 本文提出的方法 | 0.119 6         | 0.022 3 | 0.081 5           | 0.016 1 |

## 参考文献:

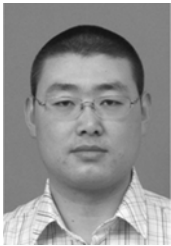
- [1] 郭俊杰,邱丽荣,王允,等. 用于惯性约束聚变靶丸测量的激光差动共焦传感器[J]. 光学精密工程, 2013,21(3):644-651  
GUO J J, QIU L R, WANG R, *et al.*. Laser differential cofocal sensor for ICF capsule measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 644-651. (in Chinese)
- [2] 刘国淦,张学军,王权陡,等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. 光学精密工程,2001,9(2):142-145.  
LIU G J, ZHANG X J, WANG Q T, *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 142-145. (in Chinese)
- [3] 邵晶,马冬梅,张海涛,等. 极小孔径衍射波前测试分析[J]. 光学精密工程,2014,22(10):2639-2644.  
SHAO J, MA D M, ZHANG H T, *et al.*. Evaluation of wavefront diffracted from ultra small aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2639-2644. (in Chinese)
- [4] 刘乾,王洋,吉方,等. 基于频域分析的抗振移相干涉测量[J]. 光学精密工程,2015,23(1):252-259.  
LIU Q, WANG Y, JI F, *et al.*. Vibration-insensitive phase-shifting interferometry based on frequency domain analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):252-259. (in Chinese)
- [5] 马小军,高党忠,叶成刚,等. 相移动干涉法测量 ICF 微球内表面粗糙度[J]. 强激光与粒子束,2008,20(2):224-228.  
MA X J, GAO D ZH, YE CH G, *et al.*. Interior surface soughness of ICF micro-shells with phase shift interference technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 224-228. (in Chinese)
- [6] WANG D D, YANG Y Y, CHEN CH, *et al.*. Calibration of geometrical systematic error in high-precision spherical surface measurement [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(16): 3878-3885.
- [7] 单宝忠,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程,2002,10(3):318-323.  
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 318-323. (in Chinese)
- [8] WANG D D, YANG Y Y, CHEN CH, *et al.*. Misalignment aberrations calibration in testing of high-numerical-aperture spherical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14): 2024-2031.
- [9] 刘江,苗二龙,曲艺,等. 基于光强自标定移相算法检测光学面形[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2007-2013.  
LIU J, MIAO E L, QU Y, *et al.*. Measurement of optical surface based on intensity self-calibration phase-shift algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2007-2013. (in Chinese)
- [10] 许幸芬,曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. 光学学报,2009,29(3):733-737

## 5 结 论

本文针对微球形貌检测中传统的调整误差修正方法残差过大的问题进行了讨论,对偏心引入的光程差数学模型进行了分析,推导出偏心误差的高阶近似模型,提出了小曲率半径下的偏心误差修正方法,并给出了误差修正流程及相关参数的标定方法。对 2 mm 直径的微球表面形貌检测的实验显示,相对于零条纹时的形貌误差基准,采用本文提出方法修正后的残余形貌误差 PV 值仅为 0.081 5 $\lambda$ ,RMS 仅值为 0.016 1 $\lambda$ ,可以满足高精度微球形貌检测的需求,由此验证了所提出的误差修正方法的可行性和有效性。

- XU X F, CAO Y P. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach[J]. *Acta Optica Sinica.*, 2009, 29(3): 733-737. (in Chinese)
- [11] 钱晓凡, 李斌, 李兴华, 等. 横向剪切最小二乘相位解包裹算法的改进[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 0209001.
- QIAN X F, LI B, LI X H, *et al.*. Improvement of least-square phase unwrapping algorithm based on lateral shearing interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 0209001. (in Chinese)
- [12] 钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209001.
- QIAN X F, RAO F, LI X H, *et al.*. Accurate least-squares phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 ( 2 ): 0209001. (in Chinese)

#### 作者简介:



卢丙辉(1982—),男,黑龙江海伦人,博士研究生,2005年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2009年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,主要从事干涉法形貌检测方面的研究。E-mail: mik-net0594@163.com

#### 通讯作者:



刘国栋(1974—),男,辽宁大连人,博士生导师,教授,1996年,1998年,2005年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为精密视觉检测技术、激光传感测量技术。E-mail: lgd@hit.edu.cn

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)