

文章编号 1004-924X(2016)12-3012-08

光学非球面三坐标测量中的像散补偿

范晓明¹, 罗词金^{1,2*}, 徐学科², 吴令奇², 胡晨²

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430070;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

摘要:利用三坐标测量仪在光学非球面镜研磨与粗抛阶段进行面形检测时,测量结果常由于补偿程序不完善而出现像散误差。本文分析了非球面三坐标测量得到的数据,指出测量结果中出现像散误差是测头半径补偿不准确所致。然后,提出了一种离线数据处理方法对测量数据进行补偿来消除像散误差。该方法通过计算网格排列的测头中心点行和列方向的切向量得出曲面上每个点的法向量;根据测头半径计算出测头球心到接触点的偏移量,从而实现三坐标测量仪的三维测头半径补偿。球面样板实验显示这种方法可以将该样板测量中的像散峰谷值(PV)由 $4.9219\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.0652\ \mu\text{m}$,基本消除了测量结果中的像散误差,提高了三坐标测量结果的准确度。实验结果验证了提出的三维测头半径补偿程序的有效性。

关键词:非球面检测;三坐标测量仪;测头半径补偿;像散补偿

中图分类号:TH703;TH721 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.3012

Compensation of astigmatism in coordinate measurement for optical aspheric elements

FAN Xiao-ming¹, LUO Ci-jin^{1,2*}, XU Xue-ke², WU Ling-qi², HU Chen²

(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

* Corresponding author, E-mail: luocij@qq.com

Abstract: When a three Coordinate Measurement Machine is used to test the surface shape of an aspheric element in grinding and polishing, obtained result often shows astigmatism errors due to an imperfect compensation programming. This paper analyzes these measurement data, and points out that the astigmatism errors comes from the imprecise compensation programming for the radius of three-dimensional probe in the CMM. Then, It presents an off-line data processing method to compensate the measurement data and to eliminate the astigmatism. By calculation of the tangent vectors of row and column at the meshed central point, the normal vector of each point on the surface is obtained. By calculation of the offsets between the centers of probe and the contact points, the radius of the tree-di-

mensional probe in the CMM is compensated. The experiment of a standard sphere show that this method decreases the astigmatism PV(Peak-to-Valley) of the measurement result from $4.9219\ \mu\text{m}$ to $0.0652\ \mu\text{m}$, eliminating basically the astigmatism errors and improving the accuracy of the coordinate measurement. Obtained results verify the effectiveness of the proposed compensation programming for the radius of tree-dimensional probe in the CMM.

Key words: aspheric element testing; Three Coordinate Measuring Machine(CMM); compensation for radius of probe; astigmatism compensation

1 引言

光学非球面元件在国防、空间光学等领域的应用越来越广泛,人们对非球面光学加工工艺和检测技术也提出了更高的要求。非球面轮廓测量法是通过三坐标测量仪或轮廓仪等测量设备获得工件表面各点坐标值,进而分析得到非球面面形误差^[1]。坐标测量法是研磨与粗抛光阶段检测面形的主要方法,也是保证研磨和抛光两个阶段顺利衔接的加工与检测的关键技术^[2]。使用三坐标测量仪测量非球面能够直接得到面形数据,操作简便而且还能保持较高的检测效率。三坐标测量仪测量曲线、曲面时,得到的是测头球心的运动轨迹,由于测球具有一定的半径,因此应对测量数据进行测头补偿。目前的三坐标测量仪的测头补偿方法中最为常用的是二维自动补偿法,即在测量过程中,只考虑测量点和测头半径的二维关系,同时将补偿数据引入测量软件中,在测量过程中实时完成测量数据的测头补偿。由于这种补偿方法缺少了垂直于扫描平面方向上那一维的补偿,对于非球面的曲面扫描测量,会引入沿扫描方向的误差,使得测量结果中出现像散。目前国外的一些公司大都采用直接修正法进行修正,即测头在探测过程中,能够得到并返回测杆的三维变形量,通过计算变形量得出被测点的法向矢量。然而,这种方法在实际测量过程中不能满足高精度要求。

目前常用的三维补偿方法有:微平面法,微球面法和曲面拟合法等^[3]。中国航空精密机械研究所应用微平面法修正测头半径,即在被测点附近测得若干个,求出由这些点组成的平面的法向矢量,对被测点进行补偿。深圳大学的全荣^[4]等提出了一种用函数修正测头半径的方法。他们使用大挠度三次样条函数连接每一个截面的测量

点,用基样条函数连接各个截面,得到由基样条函数和大挠度三次样条曲线组成的混合曲面,然后根据曲线曲面方程求出任一点的法向矢量,进行测头补偿。对于点列有序的大量数据点,Liang和Lin^[5]使用两列数据构建三角网格,然后求解网格法向矢量,在此基础上,提出了一种对三角形中的测量点沿法矢方向进行补偿的方法。Mayer^[6]等利用 kriging 插值法拟合测头中心曲面,得到曲面相应点的法线方向,然后计算出每个测点的偏移值,最后对偏移后的测点数据再次应用 kriging 插值法,得到补偿后的曲面。Lin和Sun^[7]提出了网格平均矢量法。该方法首先在被测曲面上定义网格以获得一系列规则有序的点集,然后将令补偿点与其邻近 4 点形成的向量分别叉乘,计算出 4 个法向量,再用 4 个向量加权计算得到平均法向量,以此向量方向作为测头半径的补偿方向进行半径补偿。该方法适用于较为平坦的曲面,其数据处理过程中需要做多次向量运算,效率不够高。

针对上述补偿方法都无法有效减小非球面三坐标测量中产生的像散误差的问题,本文基于相邻网格点法结合微平面法思想,提出了一种三维补偿方法。首先使用 Matlab 软件对三坐标测量数据进行预处理,再根据相邻网格点数据计算各测量点法向矢量,最后根据曲面各个点的法向矢量和测头半径数值计算出偏移量,最终实现测头半径的三维补偿,从而有效减少了像散误差。

2 像散误差的来源和分析

2.1 坐标测量方法

光学非球面的三坐标测量一般采用光栅式扫描测量方法^[8],即从工件的边缘开始,首先取定 X(或 Y)坐标值并固定,测头沿 Y(或 X)方向在 YZ(或 XZ)平面内进行直线扫描,接下来在 X(或 Y)

坐标值方向根据给定步长取定 X (或 Y) 坐标值并固定,沿 Y (或 X) 负方向在 XZ 平面内进行同样的直线取点,如此反复在光学非球面元件上进行光栅式测量。

2.2 像散误差来源

二维在线自动补偿方法,即在测量时,将测量点和测头半径的关系都视为测头运动平面内的二维情况,在垂直于运动平面的方向上并没有进行补偿。当测量截面与接触点法向矢量处于同一平面时,测量点连线为平面曲线,二维补偿可以有效减小测头半径误差。然而当测量截面与接触点的法向矢量不在同一个平面时,如图 1 所示,测量点连线为空间曲线,其与接触点轨迹不在同一平面内,二维补偿无法准确补偿垂直于运动方向上的测头误差。在这种情况下,运用 matlab 软件和非球面方程构建理论非球面并模拟出测头中心所在曲面,假如是沿 y 轴方向进行光栅式扫描测量的,若根据理论面法向矢量进行二维补偿,则在曲面法向矢量的 3 个分量中 x 轴方向不存在补偿, y 和 z 方向上的补偿矢量分布如图 2(彩图见期刊电子版)所示。所以在非球面的三坐标测量过程中,由于机器自带二维补偿忽视了垂直于扫描方向上的补偿,使得测量结果中出现了像散等误差。

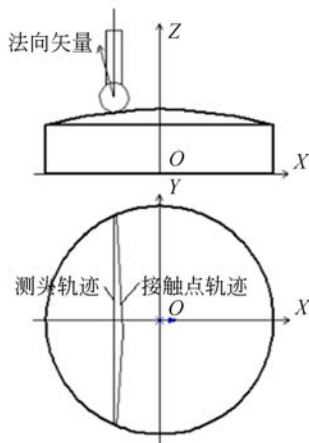
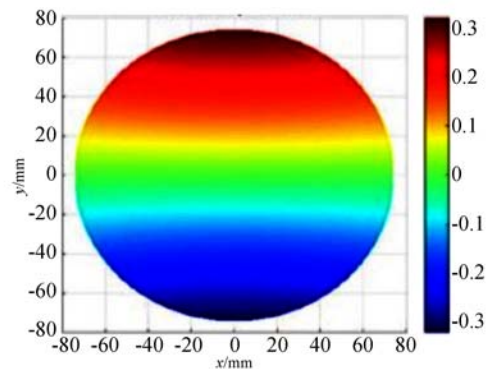


图 1 测头轨迹与接触点轨迹

Fig. 1 Tracks of probe and contact points

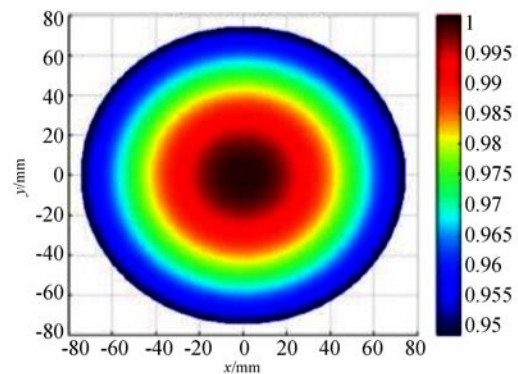
二维补偿方法简化了实际情况中复杂的三维补偿计算,在不影响测量采点和扫描速度的情况下能够实时得出补偿结果,在对一些规则形状的表面测量非常简便、精确^[9]。但对于一些复杂曲面,由于测量方向和测量点的法向矢量不一致,用二维补偿方法进行补偿则会引入新的补偿误

差,满足不了当前工程的高精度要求。



(a) y 轴矢量分布

(a) Vector distribution of y -axis



(b) z 轴矢量分布

(b) Vector distribution of z -axis

图 2 二维补偿中 y 轴和 z 轴的矢量分布

Fig. 2 Vector distributions of y -axis and z -axis in two-dimensional compensation

3 三维半径补偿算法

3.1 基本原理

为了提高非球面三坐标测量方法的精度,减少像散误差,必须使用有效的测头半径补偿方法替代原本的二维补偿方法。而测头半径补偿的关键是确定测头与被测工件接触点的法向矢量,然后根据每个点的法向矢量进行半径补偿^[10]。在这一思路的指导下,本文提出了三维半径补偿方法。首先用 Matlab 对三坐标测量得到的未经补偿的数据进行预处理,去除重复无效点,并重新规划排列数据,使得测量数据点呈四边形网格分布,再利用栅格点法线算法计算出曲面上每个点的法

向矢量,然后进行半径补偿,最后将所得结果与理论数据进行对比和误差分析。

3.2 测点分布

在测点的分布上,需要调整设备参数使得点与点的距离适中,若测点间相距太远,则将使得平面偏离被测曲面,不能得到准确的补偿半径;若相距太近,则会使各点的测量误差叠加较大,导致求出的法线方向误差大。因此需根据被测曲面的工件尺寸、曲率半径和测头大小等因素确定相邻点的间距。

3.3 栅格点法线算法

假设三坐标测量仪不经过二维半径补偿得到的测头中心坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,经过上述 matlab 预处理程序之后将坐标数据点按空间位置重新排布成如图 3 所示的行列对齐的四边形网格。

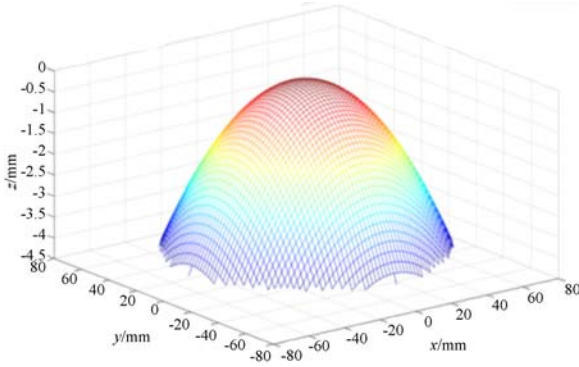


图 3 数据点网格模型

Fig. 3 Grid model of data points

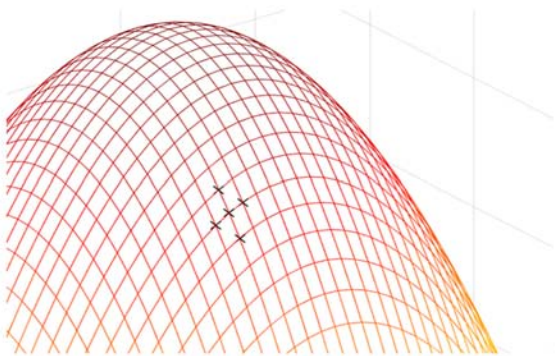


图 4 取点示意图

Fig. 4 Schematic of extration points

栅格点法线算法步骤如下,为了确定网格中每个点的法线方向,首先构造行和列两个方向的滤波器 $st1=1/2[1\ 0\ -1]$, $st2=1/2[-1;0;1]$,然后取每个点所在行和列中相邻的 4 个点如图 4

所示;接着利用 Matlab 中的滤波函数 filter2 计算每行和每列前后两个点在 X、Y 和 Z 方向上的平均差值,以此确定该点在行和列方向上的两个切向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} ,利用切向量叉乘得到曲面上该点的法向向量 \mathbf{n} ,其中 \mathbf{i}, \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 分别是 X、Y 和 Z 方向上的单位向量。向量 \mathbf{a}, \mathbf{b} ,法向矢量 \mathbf{n} 与单位法向矢量在 x, y, z 方向上的分量分别为 $a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z, n_x, n_y, n_z, N_x, N_y, N_z$ 。 m 为向量 \mathbf{n} 的模,具体算法如下:

$$a_x = \text{filter2}(st1, X_0), b_x = \text{filter2}(st2, X_0), \quad (1)$$

$$a_y = \text{filter2}(st1, Y_0), b_y = \text{filter2}(st2, Y_0), \quad (2)$$

$$a_z = \text{filter2}(st1, Z_0), b_z = \text{filter2}(st2, Z_0), \quad (3)$$

$$\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z), \mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z), \quad (4)$$

$$\begin{cases} n_x = -(a_y \cdot b_z - a_z \cdot b_y) \\ n_y = -(a_z \cdot b_x - a_x \cdot b_z) \\ n_z = -(a_x \cdot b_y - a_y \cdot b_x) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{n} = n_x \cdot \mathbf{i} + n_y \cdot \mathbf{j} + n_z \cdot \mathbf{k}, \quad (6)$$

对所得向量 \mathbf{n} 进行单位化处理,得到被测点的单位法向矢量,经过半径补偿即可得到表面被测点的坐标^[11]。

$$m = \sqrt{n_x \cdot n_x + n_y \cdot n_y + n_z \cdot n_z}, \quad (7)$$

$$N_x = \frac{n_x}{m}, N_y = \frac{n_y}{m}, N_z = \frac{n_z}{m}, \quad (8)$$

$$X = X_0 \pm r \cdot N_x, Y = Y_0 \pm r \cdot N_y, Z = Z_0 \pm r \cdot N_z, \quad (9)$$

(X_0, Y_0, Z_0) 为三坐标不经过补偿测得的测头球心坐标, r 为测头半径, (X, Y, Z) 为经过三维补偿后得到的测量点坐标(当测头位于被测曲面法向矢量一侧时,取“-”号,反之取“+”号)^[9]。然后将补偿后的 X, Y 带入非球面方程:

$$z = \frac{cr^2}{1 + [1 - (k+1)c^2r^2]^{1/2}}, \quad (10)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, k = -e^2, c = 1/r$$

式中: r 为径向位置, k 为二次曲面偏心率 e 的函数,而 $k = -e^2$, c 为近轴曲率, $c = 1/R_0$, R_0 为顶点曲率半径。

由于三坐标测量仪得到的数据为被测面各点的 x, y 和 z 坐标,数控加工设备也能将三维数据转化为更适合研抛加工的法向偏差数据,因此为了提高数据处理效率以及避免在转换为法向偏差的过程中引入新的误差,通过计算非球面的 Z 坐标与理论值 Z 的差值,得到所测非球面在 Z 方向

上的残差 RES。由 X,Y 和 RES 在 Matlab 中绘出三维残差图,进行误差分析。

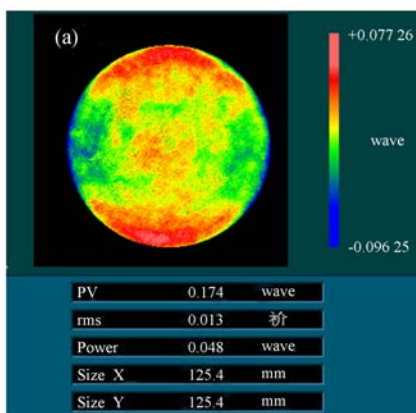
4 测量实验与结果

4.1 实验方案

为了验证算法的有效性,同时确保实验不受非球面曲率半径变化的影响^[12],实验使用爱德华公司的 ML121510 三坐标测量仪对光学标准球面样板进行检测。通过对口径 $D=132\text{ mm}$,半径 $R=542\text{ mm}$ 的球面样板进行光栅式扫描测量(使用自带二维补偿与关闭补偿各测量一次),并将关闭补偿所测数据带入上述 Matlab 程序中进行三维补偿,与自带二维补偿的残差结果进行比较,分析该程序半径补偿的有效性。

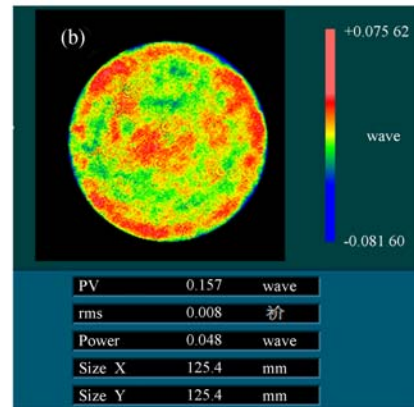
首先,使用美国 ESDI 公司生产的 IntelliPhase TMZ100 激光干涉仪对该球面样板进行标定,取 125.4 mm 的有效口径,去除 PST(piston),TLT(tilt)和 PWR(power)等不相关误差后的检测结果如图 5(a)(彩图见期刊电子版)所示。该样板的面形峰谷值(PV)为 0.174λ ,均方根值 rms(Root-Mean-Square)为 $0.013\ \mu\text{m}$ 。图 5(b)(彩图见期刊电子版)为去除像散后的面形,由此得出该样板中像散的 PV 值为 0.017λ ,rms 值为 $0.005\ \mu\text{m}$ 。上述结果说明样板几乎不存在像散。 $(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$

实验参数设置如下:测头半径为 $r=1\text{ mm}$;扫描速度为 10 mm/s ;扫描频率为 10 点/s ;采样间隔为 1 mm/点 ;线间间距为 1 mm 。



(a) 未去像散结果

(a) Results with astigmatism



(b) 去像散结果

(b) Results without astigmatism

图 5 干涉仪测量结果

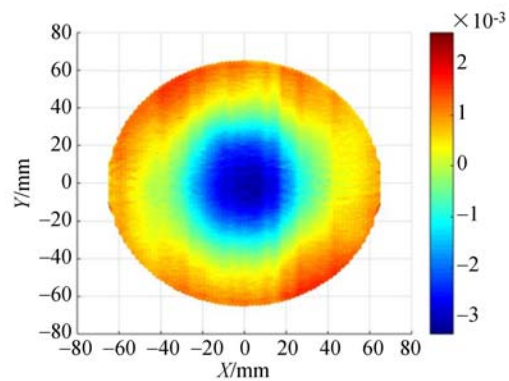
Fig. 5 Measurement results of interferometer

4.2 实验结果对比

在相同的实验参数下,第一组数据为三坐标测量仪关闭机器自带补偿功能,将测量所得数据导入上述三维补偿算法后得到的三维补偿数据;第二组数据为使用机器自带补偿功能得到的二维补偿数据。

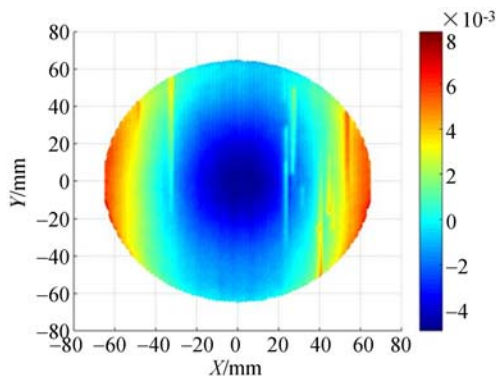
将两组数据分别导入 Matlab 残差分析程序,得到三维补偿和二维补偿的残差如图 6(彩图见期刊电子版)所示。由程序拟合结果可以得出,三维补偿的残差分布更加均匀合理,较符合实际情况,而二维补偿的残差分布中出现了明显的像散。由于标准球面样板是没有像散的,因此二维补偿中出现的像散来源于测头半径补偿的不准确性。

为进一步分析两组数据中的像散大小,将两组数据转为 xyz 格式文件导入 ZYGO 干涉仪软



(a) 三维补偿

(a) Three-dimensional compensation

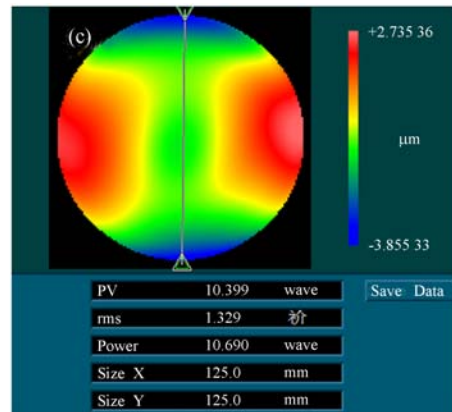


(b)二维补偿

(b)Two-dimensional compensation

图 6 残差图

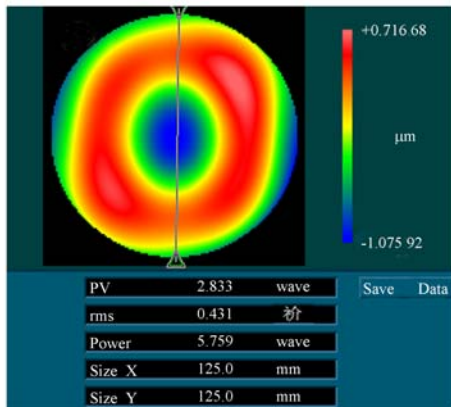
Fig. 6 Residual plots



(c)二维补偿未去像散

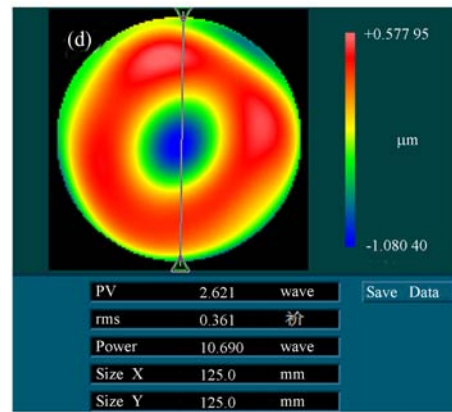
(c)Two-dimensional compensation with astigmatism

件 MetroPro 进行分析,取 95%的有效口径,去除 PST(piston),TLT (tilt)和 PWR (power)等不相关误差后,分别比较三维补偿和二维补偿去除



(a)三维补偿未去像散

(a)Three-dimensional compensation with astigmatism

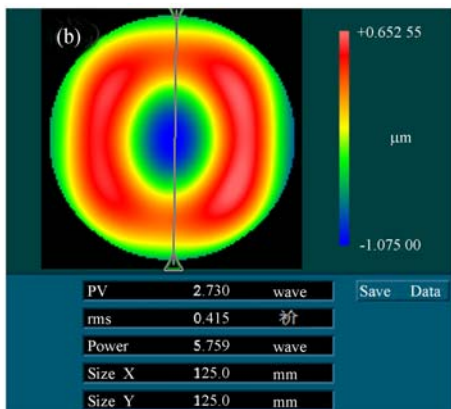


(d)二维补偿去除像散

(d)Two-dimensional compensation without astigmatism

图 7 实验结果对比图

Fig. 7 Contrast diagrams of experiment



(b)三维补偿去除像散

(b)Three-dimensional compensation without astigmatism

像散误差 AST 前后的 PV、rms 等参数,结果如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

通过对比可以发现,三维补偿中的像散 PV = 0.103λ(0.065 μm),rms = 0.016 μm,二维补偿中的像散 PV = 7.778λ(4.922 μm),rms = 0.968 μm。实验结果对比表明,三坐标测量仪中的二维补偿程序在高精度光学曲面测量中引入了像散误差,而本文提出的三维测头半径补偿程序可以对未经补偿的数据进行更加准确的补偿,明显消除数据中的像散误差。而且三维补偿后的数据更接近干涉仪的测量结果,因此可以认为本文方法有效减少了二维补偿中出现的像散误差(λ = 0.632 8 μm)。

5 结 论

对于非球面坐标测量过程中出现的像散误差,其实质是测头半径补偿的不准确产生的误差。本文通过分析非球面三坐标测量数据,找出了测量结果中出现像散误差的原因,据此提出了三坐

标测量仪测头半径补偿的 Matlab 算法模型,该模型将实验样板中像散 PV 值减小了 98.7%,其可以有效减少测量结果中出现的像散误差。由于采样间隔无法完全保持一致使得所求法向矢量与实际情况仍存在微小误差,但与三坐标测量精度相比,该误差可以忽略,故该三维半径补偿程序可以有效提高非球面的三坐标测量精度。

参考文献:

- [1] 王建明. 三坐标轮廓测量仪检测非球面研究[D]. 苏州:苏州大学,2013.
WANG J M. *Study on aspheric surface measurement using coordinate contour measuring machine* [D]. Suzhou:Soochow University, 2013. (in Chinese)
- [2] 李圣怡. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
LI SH Y. *New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-Scale Aspheric Surfaces* [M]. Beijing:Changsha:National Defend Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 蔺小军,王增强,单晨伟. 自由曲面 CMM 测量测头半径补偿方法[J]. 航空制造技术,2011(10):68-70,78.
LIN X J, WANG Z Q, SAN CH W. Method of probe radius compensation for free surface measurement by CMM [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(10):68-70,78. (in Chinese)
- [4] 全荣,翁玲. 三坐标测量机测头半径对测量数据的影响及其消除方法[J]. 计量学报,1993(4):251-255.
QUAN R, WENG L. The influence of probe radius on the test data in three-coordinate measuring machine and its eliminating method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1993(4):251-255. (in Chinese)
- [5] LIANG S R, LIN A C. Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering [J]. *Computers in Industry*, 2002, 48(3):241-251.
- [6] MAYER J R R, MIR Y A, TROCHU F, *et al.*. Touch probe radius compensation for coordinate measurement using kriging interpolation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 1997, 211(1):11-18.
- [7] LIN Y C, SUN W I. Probe radius compensated by the multi-cross product method in freeform surface measurement with touch trigger probe CMM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 21(10):902-909.
- [8] 郭隐彪,郭江,王振忠. 非球面检测路径与高精度曲线拟合算法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10):1201-1204.
GUO Y B, GUO J, WANG ZH ZH. Study on measuring path and high-precision curve fitting algorithm for axisymmetric aspheric optics [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(10):1201-1204. (in Chinese)
- [9] 王红敏. 三坐标测量机测头半径补偿技术及应用[J]. 制造技术与机床, 2010(6):109-112,115.
WANG H M. Compensation technology and application for probe radius of coordinate measuring machine [J]. *Technology and Test*, 2010(6):109-112, 115. (in Chinese)
- [10] 贾立德,郑子文,李圣怡,等. 光学非球面坐标测量中位姿误差的分离与优化[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1229-1234.
JIA L D, ZHENG Z W, LI SH Y, *et al.*. Separation

- tion and optimization of posture errors in optical aspheric coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1229-1234. (in Chinese)
- [11] 颀赤鹰,陈少克. 三坐标测量机测头半径补偿的新方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2006(1): 50-52.
- XIE CH Y, CHEN SH K. A new method of the CMM probe radius compensation [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technology*, 2006(1):50-52. (in Chinese)
- [12] 尤越,王乔方,字正华. 一种基于 Matlab 的非球面光学元件面形参数测试技术[J]. *红外技术*, 2014(4):331-335.
- YOU Y, WANG Q F, ZI ZH H. A test technique of surface shape aspheric optics parameters based on matlab [J]. *Infrared Technology*, 2014(4): 331-335. (in Chinese)

作者简介:



罗词金(1993—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事非球面加工与检测方面的研究,E-mail:luocij@qq.com

导师简介:



范晓明(1963—),男,湖北洪湖人,博士,副教授,主要研究方向为铸造合金与工艺,E-mail:fanxm@whut.edu.cn