

文章编号 1004-924X(2017)12-3079-10

圆弧金刚石砂轮三维几何形貌的 在位检测和误差评价

周 炼*, 安晨辉, 侯 晶, 陈贤华, 王 健
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:针对非球面光学元件加工对圆弧金刚石砂轮形状误差测量的需求,提出了砂轮三维几何形貌在位检测与误差评价方法。建立了砂轮外圆面螺旋扫描轨迹测量数学模型,利用位移传感器获取了砂轮表面轮廓数据;对得到的数据匀滑滤波后沿圆周展开并进行插值处理,得到砂轮三维几何形貌。然后,根据非球面平行磨削加工特点,提出评价圆弧砂轮形状精度的指标。通过提取三维几何形貌轴截面轮廓,进行最小二乘圆弧拟合得到不同相位处的圆弧半径与圆心坐标,并由误差分离获得砂轮表面圆弧的圆度误差、圆周跳动误差及轮廓圆心轴向偏差。最后,对非球面加工圆弧金刚石砂轮进行检测,获得了砂轮的三维几何形貌以及多个关键尺寸及其误差数据:即圆弧金刚石砂轮的平均圆弧半径为 55.442 3 mm,半径波动极差为 0.16 mm,中央±8 mm 环带内圆弧的圆度误差约为 5 μm,圆周跳动误差约为 2 μm,截面轮廓圆心轴向位置相对偏差为 0.008 mm。根据检测结果,进行了大口径复杂非球面磨削实验,得到的元件面形 P-V 值为 4.62 μm,RMS 值优于 0.7 μm,满足工程的实际需求。

关键词:非球面磨削;圆弧金刚石砂轮;三维形貌误差;在位测量;螺旋扫描测量

中图分类号:TG743,TG580.619.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3079

3D geometric topographic measurement and error evaluation of arc diamond wheel

ZHOU Lian*, AN Chen-hui, HOU Jing, CHEN Xian-hua, WANG Jian

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouyinglianli@foxmail.com

Abstract: For the purpose of detecting 3D geometric topography of an arc diamond wheel precisely and efficiently in aspheric element processing, the methodology of on-machine measurement and the error evaluating of 3D geometric topography were proposed. Firstly, the mathematical model of screw-scanning track for the diamond wheel was established, and the profile data of the diamond wheel were acquired by a displacement sensor. After data filtering and interpolating, the 3D geometric topography of the diamond wheel was established. According to the feature of aspheric parallel grinding, some parameters to criticize the shape accuracy of arc wheel were put forward. By extracting the wheel profile of the axial direction, the arc radius and center coordinates were calculated by least-square circle fitting. And by error segregating, arc error, circular runout error and the deviation of profile center for

收稿日期:2017-09-13;修订日期:2017-10-09.

基金项目:科学挑战计划专题资助项目(No. JCKY2016212A506-0504);国防科技重大专项基金资助项目(No. GFZX0502010203.1)

the diamond wheel were extracted. Finally, an arc diamond wheel in aspheric element processing was measured experimentally. Some key dimensions and errors of the diamond wheel were achieved. The average radius of the wheel is 55.442 3 mm and the fluctuation range of radius is 0.16 mm. The arc error in the girdle of ± 8 mm is about $5 \mu\text{m}$, the circular runout error is about $2 \mu\text{m}$ and the relative deviation of profile center is 0.008 mm. By using those measured data, a large scale aspheric optics grinding experiment was performed and results show that the surface errors(P-V and RMS) of the element are about $4.62 \mu\text{m}$, and below $0.7 \mu\text{m}$, respectively, which satisfies the engineering requirements.

Key words: aspheric grinding; arc diamond wheel; 3D topography error; on-machine measurement; screw-scanning measurement

1 引言

非球面光学元件能够消除光线在传播过程中产生的球面像差,因其能够改善成像质量,扩大视场,减少光能损失,提高聚焦和校准精度。在国防和高科技民用领域得到了广泛地应用^[1]。采用传统的光学加工方法将坯料铣磨至最接近球面后,再手工修抛至非球面,不但耗时长,且对操作人员的依赖性较大^[2]。在超精密磨削机床上利用圆弧金刚石砂轮将元件坯料一次加工至非球面的平行磨削方法,是目前大尺寸异形非球面光学元件的重要精密成形手段^[3]。超精密磨削加工利用运动复印原理获得被加工表面,砂轮的形状误差最终会影响元件的加工精度^[4-5]。在非球面元件的磨削过程中,根据非球面的数学方程、砂轮圆弧半径和砂轮基础部分半径,按照一定的算法得到砂轮运动的三维坐标点,实现对加工轨迹的精确控制^[6];此外,砂轮高速旋转过程中的圆周跳动误差、圆弧中心轴向偏差也会在元件表面复制周期性波纹,从而影响元件的中频误差^[7]。对圆弧砂轮形状精度进行精确检测,是进行高精度非球面元件磨削加工之前必须完成的工作。

Andrew M 等人设计了磨削砂轮光学扫描系统,用于砂轮表面微观三维形貌的测量,可以准确获得砂轮表面磨粒数量、磨粒尺度和磨粒面积等磨粒分布信息^[8-9];崔长彩等人开发了基于干涉测量原理的金刚石砂轮表面形貌专用测量系统,结合粒子群优化算法拼接技术,用于砂轮表面较大范围三维形貌的观测^[10-11],但以上方法均不能反映砂轮的几何尺寸误差;陈根余等人利用计算机、CCD 位移传感器等搭建砂轮激光在线整形与

检测系统,实现砂轮在线整形和表面轮廓的高精度测量^[12],但同样不能对非球面磨削砂轮圆弧半径、圆弧中心偏差和圆周跳动等参数进行准确地检测;柯晓龙等利用位移传感器,搭建了圆弧金刚石砂轮精密在位检测系统,通过对砂轮表面有限数量轴截面轮廓进行取样检测,实现了对砂轮圆弧半径的精密测量^[13],但该方法采用的人工逐点检测,在工程应用中效率较低,并且采样数据量也受到限制,无法完全反映砂轮三维几何形貌。

为准确、高效地获得非球面磨削圆弧砂轮的关键几何尺寸信息,本文从工程测量效率与精度出发,建立螺旋式测量路径数学模型,利用激光位移传感器,对圆弧金刚石砂轮表面形貌进行连续扫描测量;利用 Matlab 对测量数据进行分析处理,重构得到砂轮表面三维轮廓形貌,提取轴截面二维轮廓并进行最小二乘圆弧拟合分析,得出砂轮平均圆弧半径、圆弧中心偏差、砂轮表面圆弧的圆度误差与圆周跳动误差,并开展非球面元件磨削实验。结果表明,该测量方法满足大口径非球面元件磨削对砂轮形状误差精密测量与多参数评价的需要。

2 连续在位测量原理

如图 1 为圆弧金刚石砂轮形状误差连续在位测量原理,位移传感器安装于机床工作台表面,砂轮以某一恒定转速 $N\omega$ 旋转,同时砂轮沿轴向以某一恒定速度 v 进行运动,此时传感器会在砂轮外圆周表面连续螺旋扫描,采集并存储位移传感器获得的数据,直至完成对砂轮全表面的扫描,即完成圆弧砂轮表面形状误差的测量。

进行表面形貌非接触式检测的手段有很多,

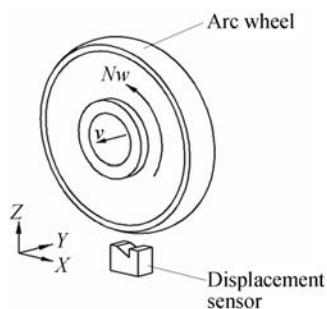


图 1 圆弧砂轮形状误差连续在位测量

Fig. 1 Continuous on-machine measurement of arc wheel

本文使用的激光位移传感器利用光三角测量原理,获得被测表面形貌位移数据。如图 2 所示,由激光器发射的平行光经发射器镜头聚焦至被测表面产生漫反射,部分光线反射至接收器镜头并汇聚至感光 CCD 元件。当被测表面发生位置变化时,感光 CCD 元件表面的成像点位置也发生变化,从而反映出被测表面的位移。当被测表面在光三角平面内存在一定的倾斜时,该倾斜量会改变反射光线相对于感光元件的空间分布,使得成像点相对于被测表面垂直出射光线时的位置发生的偏移,引入了一定的测量误差^[14]。因此,测量过程中需要保证被测表面与光三角平面的交线和出射光线方向垂直。在进行圆弧砂轮形状误差测量时,利用标准球调节传感器测头,保证出射光线垂直于 Z 方向^[15],并使光三角平面与砂轮轴向保持垂直,保证了出射光线在经砂轮表面漫反射时不存在倾斜误差。

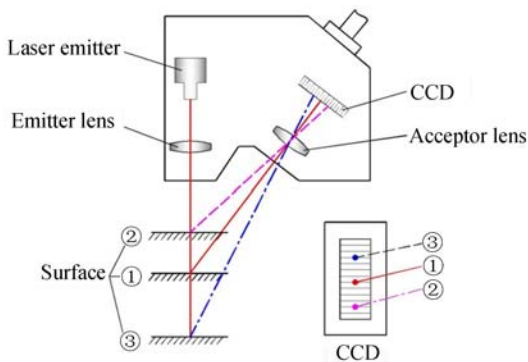


图 2 光三角测量原理

Fig. 2 Measuring principle of laser triangulation

当测量过程中出射光线未经过砂轮轴心时,也会存在一定的测量误差。如图 3 所示,假设砂轮圆弧半径为 R_a ,基础部分半径为 R_b ,出射光线

相对于砂轮轴心偏移距离为 a ,则测量得到的截面轮廓方程如公式(1)所示,该轮廓已不再是圆弧曲线。因此,为减小测量误差,在调整测量出射光线沿竖直 Z 方向后,还需要使被测光点位于砂轮外圆周最低位置处,如图 3 中 A 点,保证光线经过砂轮轴心。

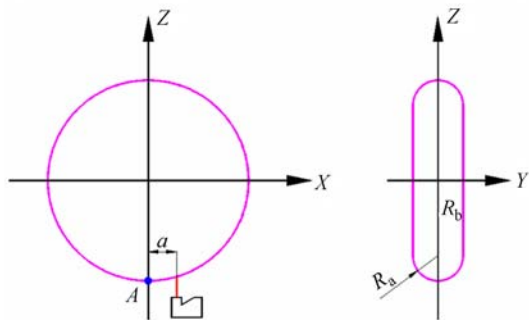


图 3 测量光路偏移引入的测量误差

Fig. 3 Measuring error caused by offset of light path

$$Z = -\sqrt{(\sqrt{R_a^2 - Y^2} + R_b)^2 - a^2} \quad (1)$$

由于获得的数据为一系列向量数据,需要将其按照砂轮一个旋转周期作为数据裁剪周期,按圆周方向裁剪,并重构为矩阵,然后对分散的采样数据点进行插值拟合,得到砂轮表面沿圆周方向展开后的误差数据,如图 4 所示。

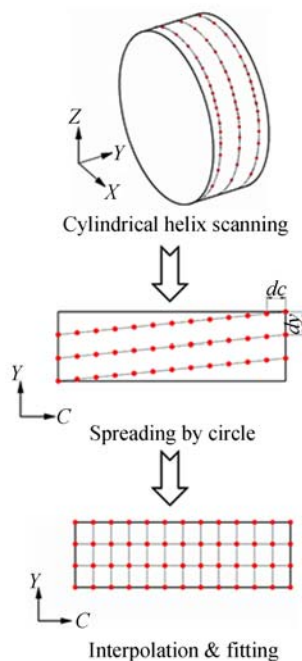


图 4 数据采集轨迹与处理流程

Fig. 4 Acquisition trajectory and workflow of data processing

相邻两离散数据点沿圆周方向的距离如公式(2)所示:

$$d_c = \frac{360 \cdot N\omega \cdot dt}{60} = 6 N\omega \cdot dt, \quad (2)$$

其中: d_c 为相邻两离散数据点沿圆周方向的距离, 单位为 ($^\circ$); $N\omega$ 为测量时砂轮旋转速度, 单位为 r/min; dt 为传感器采样周期, 单位为 s。

相邻两螺旋扫描轨迹沿 Y 方向的距离如公式(3)所示:

$$d_y = \frac{v}{N\omega}, \quad (3)$$

其中: d_y 为相邻两螺旋扫描轨迹沿 Y 方向的距离, 单位 mm; v 为砂轮沿轴向的进给速度, 单位 mm/min; $N\omega$ 为砂轮旋转速度, 单位 r/min。

3 数据处理与分析

图 5 为数据处理流程, 首先将采集到的数据进行预处理, 去除数据两端无效数据点, 匀滑滤波去除有效数据区域中的个别奇异噪声点; 然后根据螺旋扫描轨迹数学模型, 进行数据插值处理, 获得砂轮三维形貌数据矩阵。

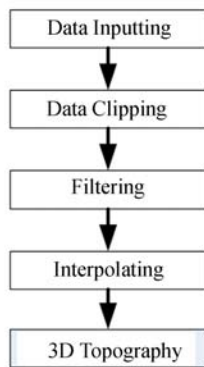


图 5 数据处理流程图

Fig. 5 Flow chart of data processing

本文中数据滤波的目的是去除奇异噪声点, 并且提供可靠的数据。噪声点往往以孤立且幅值异常的形式出现, 考虑采用改进的移动平均滤波方法, 并进行比较限幅滤波。对滤波器窗中的除被滤波点外的其余数据点进行算术平均, 与被滤波点进行比较, 超出阈值则将滤波点替换为均值, 并移动滤波器窗口遍历所有数据, 从而将数据中的噪声点全部滤除。

数据插值的目的是将按螺旋轨迹扫描测量并

滤波获得的轮廓一维向量数据, 插值为按砂轮表面轮廓展开后的矩阵数据, 得到砂轮表面三维形貌。建立坐标系 (c, y, z) , 其中 c 为砂轮的圆周方向, y 为砂轮的轴向, z 为砂轮表面形貌的高度方向, 则将轮廓一维向量数据展开变换为矩阵数据的数学描述如公式(4)所示:

$$\begin{cases} c = 6 N\omega \cdot t - 360(k-1) \\ y = \frac{W \cdot t}{n \cdot dt} = \frac{vt}{60} \\ z = z(t) = z_i \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $N\omega$ 为砂轮旋转速度, 单位为 r/min; k 为测量光点在砂轮表面的扫描圈数; W 为砂轮测量宽度, 单位为 mm; n 为所有测量数据序列的数据个数; dt 为传感器的数据采样周期, 单位为 s; v 为轴向测量速度, 单位为 mm/min; z_i 为测量传感器获得的数据序列; t 为测量光点在砂轮表面扫描时间, 单位为 s。

进行二维数据插值的方式较多, 如线性插值、三次样条插值、自然临近插值和最近临近插值, 针对不同的测量数据, 使用合理的插值方式有利于减少数据处理误差。本文中测量的砂轮外轮廓为平滑的鼓面, 采用三次样条插值的方式对数据进行处理。即在每个数据点区间 $\{(x, y) | x \in [x_k, x_{k+1}], y \in [y_q, y_{q+1}]\}$ 内, 构造一个三次函数 $z = S_{k,q}(x, y)$, 使分段曲面 $z = S(x, y)$ 及其一阶导数、二阶导数在全区间 $\{(x, y) | x \in [x_0, x_N], y \in [y_0, y_N]\}$ 内均连续。图 6 为采用该方式进行插值处理后的理论相对残余误差, P-V 值约为 6.3×10^{-8} , RMS 值达到 6.4×10^{-9} , 计算精度满足要求。

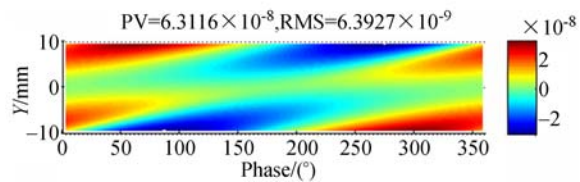


图 6 三次样条插值处理的残余误差

Fig. 6 Residual error of cubic interpolation

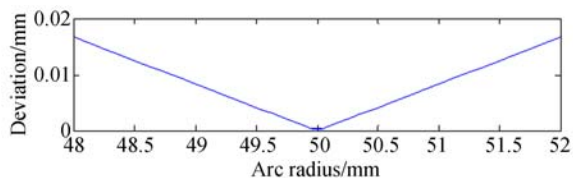
4 圆弧砂轮几何形状误差评价

对于楔形非球面、离轴非球面等异形结构的复杂曲面元件, 基于 X/Y/Z 直线坐标轴超精密磨床和平行磨削原理, 可以稳定获得高精度的非

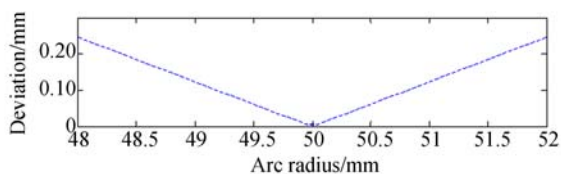
球面面形。公式(5)为非球面平行磨削加工元件表面点坐标与砂轮插补运动控制点坐标之间的传递函数关系。式中,非球面方程为 $Z=f(X,Y)$, (X,Y,Z) 为非球面表面点坐标, (X_w,Y_w,Z_w) 为砂轮插补运动控制点坐标, R_a 为砂轮平均圆弧半径, R_b 为砂轮基础部分半径,即砂轮总半径减去圆弧半径^[3]。

$$\begin{cases} X_w = X - R_a \times \frac{f_x(X,Y)}{\sqrt{[f_x'(X,Y)]^2 + [f_y'(X,Y)]^2 + 1}} - \\ R_b \times \frac{f_x'(X,Y)}{\sqrt{[f_x'(X,Y)]^2 + 1}} \\ Y_w = Y - R_a \times \frac{f_y'(X,Y)}{\sqrt{[f_x'(X,Y)]^2 + [f_y'(X,Y)]^2 + 1}} \\ Z_w = Z + R_a \times \frac{1}{\sqrt{[f_x'(X,Y)]^2 + [f_y'(X,Y)]^2 + 1}} + \\ R_b \times \frac{1}{\sqrt{[f_x'(X,Y)]^2 + 1}} \end{cases} \quad (5)$$

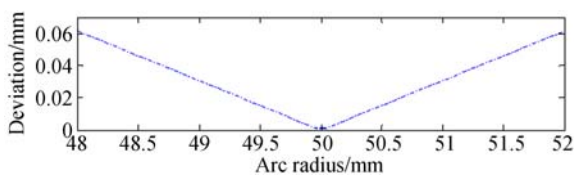
由公式(5)可知,砂轮圆弧半径检测不准确时,砂轮插补运动控制点的坐标计算就存在误差,最终将会导致元件面形精度不能满足要求。对某一型号($R_0 = 800 \text{ mm}$, $k = -2.2$, 离轴距离 300 mm)的非球面进行数值仿真计算,砂轮真实圆弧



(a) X_w deviation



(b) Y_w deviation



(c) Z_w deviation

图 7 砂轮插补运动控制点最大坐标偏差

Fig. 7 Max coordinate deviation of wheel

半径为 50 mm ,当圆弧半径存在测量误差时,砂轮插补运动控制点的最大坐标偏差如图 7 所示。

在加工元件时,该偏差会复制到元件表面,并引入圆柱形、球形或马鞍形的低频误差。

在加工元件过程中,砂轮外圆周上中央环带的每一个点都参与磨削过程。由于在进行砂轮运动控制点计算时使用的是平均圆弧半径,在不同相位处的圆弧半径及其相对于平均圆弧半径的差值,也会影响插补运动控制的精度。因此,每一条轴截面圆弧轮廓的圆弧度及不同相位处的圆弧半径波动,都会对最终非球面的面形精度产生重要影响。

高功率激光装置对非球面光学元件除了提出低频波前误差外,对中频波纹度误差也提出较高的要求,需要对磨削过程中产生的小尺度波纹进行严格控制。磨削加工利用运动复印原理获得成形表面,砂轮高速旋转的周向圆跳动误差会复印到元件表面从而产生小尺度波纹。因此,需要对非球面磨削砂轮的圆跳动误差进行精密检测与控制。

为保证后续非球面抛光加工的效率与精度,磨削加工除了需要获得高精度的非球面面形外,还需要保证非球面具有较高的位置精度,即保证非球面的参考中心点与元件的几何中心点之间具有较小的位置偏差,该过程需要通过磨削加工之前的精密对刀和后续多次在位测量,并进行迭代修正来保证。若砂轮不同相位处的截面圆弧轮廓圆心未在同一圆环平面内,沿轴向存在较大的位置偏差,则在对刀过程中无法精确测量砂轮表面磨削环带的空间位置,对刀精度受到影响,并且后续加工迭代修正过程也存在更多的不确定性。因此,需要对砂轮圆弧圆心的位置轴向偏差进行检测,指导磨削加工。

为准确获得以上非球面磨削砂轮形状精度评价指标,用过轴线的平面剖切砂轮外圆弧面,获得砂轮的轴截面轮廓线。分别将若干条轮廓线进行最小二乘圆弧曲线拟合,即可得到整个砂轮外圆弧面不同相位处轴截面轮廓线的圆弧半径与圆心坐标。假设检测得到圆弧砂轮外圆周面轴向轮廓坐标为 (Y_i, Z_i) ,其拟合圆弧的圆心坐标 $O(a, b)$ 和半径为 r ,则轮廓坐标必然满足公式(6),并且所有被测点与拟合圆弧的距离的平方和最小,即得到最小二乘的目标优化函数为公式(7)。求取公式(7)中函数的最小值所对应的 (a, b) 值即为拟

合圆弧的圆心坐标, 带入公式(6)得到拟合圆弧的半径值^[16-17]。

$$(Y_i - a)^2 + (Z_i - b)^2 = r^2, \quad (6)$$

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(Y_i - a)^2 + (Z_i - b)^2} - r]^2. \quad (7)$$

将整个砂轮不同相位处截面轮廓的圆弧半径和圆心坐标取算术平均值得到平均圆弧半径和平均圆心坐标, 并进行三维建模得到平均外圆周三维形貌, 与原始检测的三维形貌相减, 得到砂轮三维形貌误差, 该误差综合反映了砂轮表面圆弧的圆度误差和圆跳动误差。

5 圆弧砂轮形状误差测量与非球面磨削实验

实验采用 KEYENCE LK-H020 非接触式激光位移传感器进行砂轮表面形貌数据的检测, 砂轮直径为 $\Phi 400$ mm, 宽度为 20 mm, 粒度为 D15, 结合剂为树脂。传感器主要参数如表 1 所示。测量时将传感器测头固定于机床工作台表面, 测量激光竖直向上照射于砂轮表面, 并保证光点位于砂轮 X 向最低位置处, 如图 8 所示, 测量参数如表 2 所示。

表 1 激光位移传感器参数表

Tab. 1 Parameters of laser displacement sensor

参数名称	参数值
测量范围/mm	± 3
测量精度/ μm	1.2
分辨率/ μm	0.01
重复性/ μm	0.02
线性度/(%, F. S.)	± 0.02

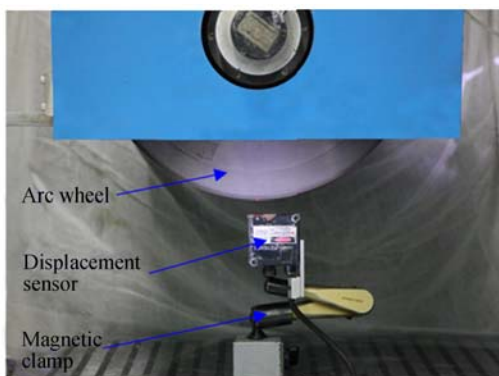


图 8 圆弧砂轮形状误差测量

Fig. 8 Measurement of arc wheel form error

表 2 圆弧砂轮形状误差测量参数

Tab. 2 Measuring parameters of arc wheel form error

参数名称	参数值
主轴转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	500
轴向进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	100
数据采集周期/ μs	100

将检测得到的原始数据导入 Matlab 后滤波、按螺旋扫描轨迹进行展开并插值处理得到砂轮三维形貌, 如图 9 所示。提取轴截面轮廓并进行圆弧拟合计算整个砂轮不同相位处圆弧轮廓的圆弧半径与圆心坐标。以平均圆弧半径和平均圆心坐标建模得到平均的砂轮外圆形貌, 并与实际检测得到的砂轮形貌作差, 得到砂轮外圆的形状误差, 如图 10 所示, 综合反映了圆弧砂轮表面轴截面圆弧的圆度误差和周向圆跳动误差。不同相位处圆弧的圆度误差如图 11 所示, 全范围内最大圆度误差约 $6 \mu\text{m}$, 中央 ± 8 mm 环带范围内的圆度误差约 $5 \mu\text{m}$ 。砂轮外圆弧面不同轴向位置处的圆度误差如图 12 所示, 单一位置处最大圆跳动误差约 $2 \mu\text{m}$ 。不同相位处砂轮轴截面圆弧半径如图 13 所示, 平均圆弧半径为 55.4423 mm, 半径波动极差为 0.16 mm, 波动率为 0.29% 。砂轮轴截面轮廓圆心位置轴向偏差如图 14 所示, 圆心位置分布在 $-0.138 \sim -0.146$ mm 带内, 相对偏差量约为 0.008 mm。

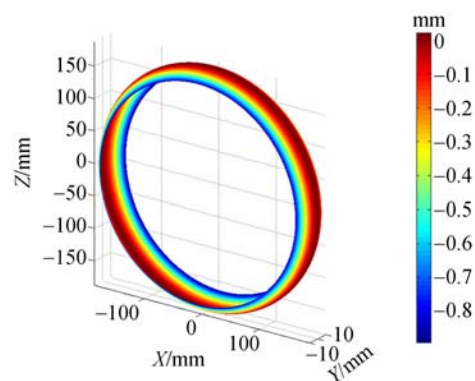


图 9 圆弧砂轮三维几何形貌

Fig. 9 3D geometric topography of arc wheel

采用文献[13]提出的方法对该砂轮进行表面逐点扫描测量, 得到砂轮表面 4 个相位处的截面轮廓及其圆弧半径如图 15 所示, 平均圆弧半径为 50.6547 mm, 半径波动极差为 0.6474 mm。误

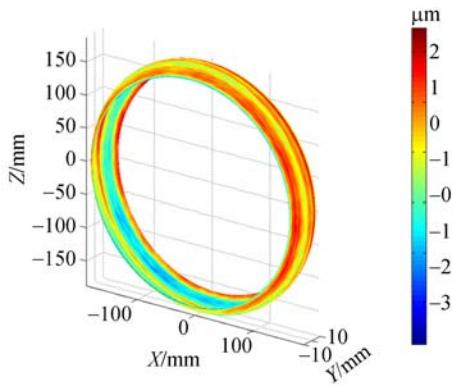


图 10 圆弧砂轮形状误差三维分布
Fig. 10 Form error of arc wheel

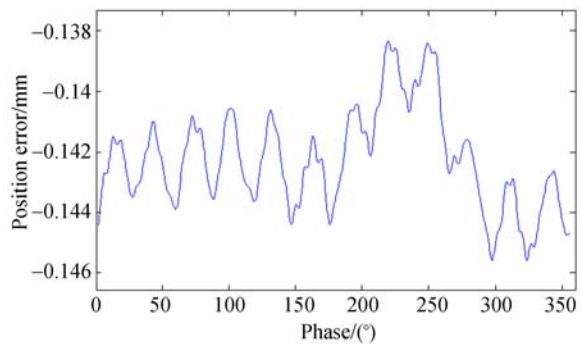


图 14 砂轮圆弧圆心轴向位置偏差
Fig. 14 Position error of arc center

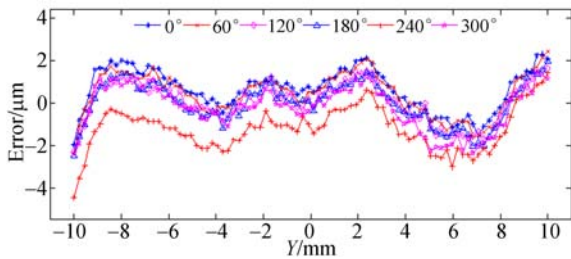


图 11 不同相位处圆弧的圆度误差
Fig. 11 Arc error of different phase

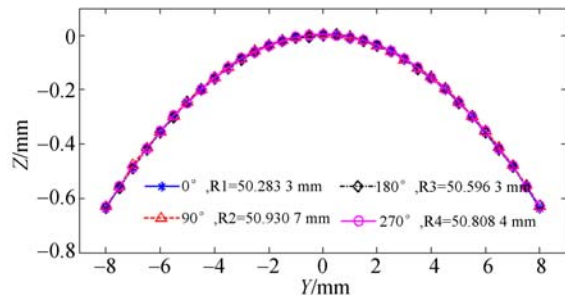


图 15 逐点测量计算的砂轮圆弧半径
Fig. 15 Radius calculation using point by point measurement

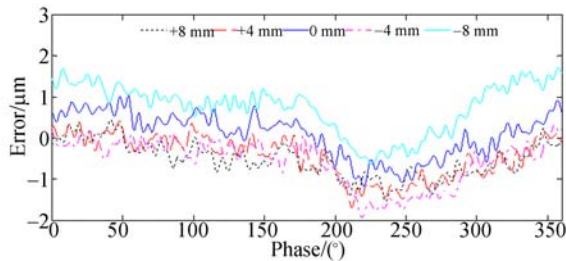


图 12 不同轴向位置处的圆度误差
Fig. 12 Roundness error of different axis position

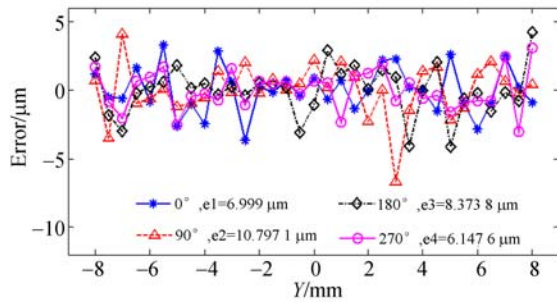


图 16 逐点测量计算的圆弧圆度误差
Fig. 16 Arc error calculated by point-point measurement

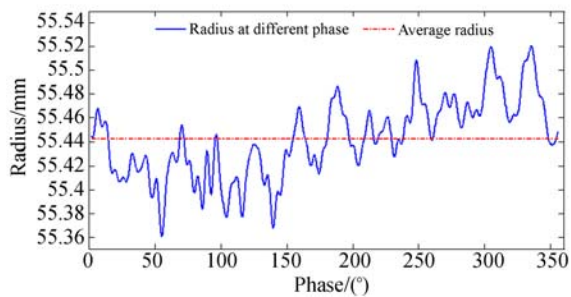


图 13 不同相位处的砂轮圆弧半径
Fig. 13 Radius of arc wheel at different phase

差分离得到 4 个相位处圆弧的圆度误差如图 16 所示,最大圆度误差约为 $10.8 \mu\text{m}$ 。

为验证圆弧砂轮检测结果是否满足工程需求,使用本文测量实验中的砂轮,在具有微米级别定位精度和亚微米级别数控分辨率的超精密成形磨削机床 MFP125 上,进行某一型号的大口径非球面元件磨削实验,磨削工艺参数如表 3 所示,非球面参数如表 4 所示,通过三维建模得到非球面的矢高图如图 17 所示,具有明显的非旋转对称性。

表 3 磨削工艺参数

Tab. 3 Parameters of grinding process

参数名称	参数值
砂轮线速度/($m \cdot s^{-1}$)	30
进给速度/($mm \cdot min^{-1}$)	6 000
每刀磨削深度/ μm	10
冷却方式	水基冷却液冷却

表 4 非球面元件参数

Tab. 4 Parameters of aspheric optics

参数名称	参数值
元件材料	熔石英
元件口径/mm	430×430
顶点曲率半径/mm	4 066.172 723
圆锥系数	-0.581 986
高次项系数	0
X 向离轴距离/mm	300
Y 向离轴距离/mm	300

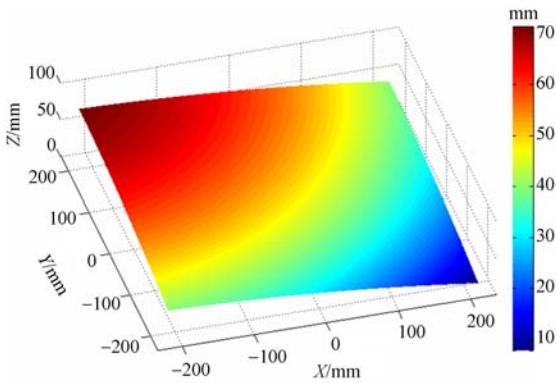


图 17 非球面三维矢高图

Fig. 17 3D topography of aspheric

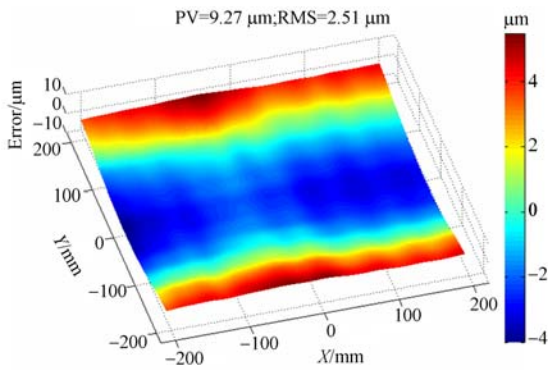


图 18 逐点法测量的砂轮加工的元件面形

Fig. 18 Form error of aspheric optics

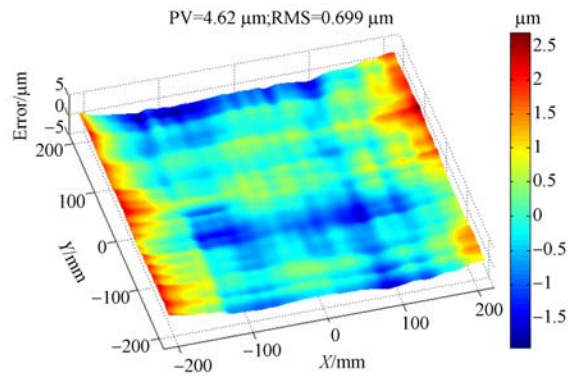


图 19 加工后的非球面元件面形

Fig. 19 Form error of aspheric optics after grinding

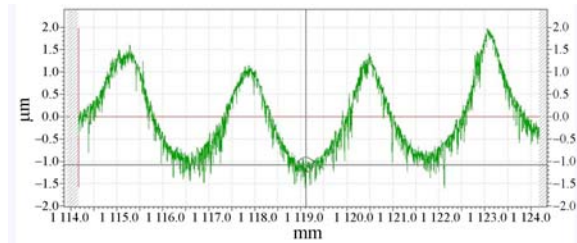


图 20 非球面表面小尺度波纹

Fig. 20 Small scale corrugation of aspheric

首先将利用文献[13]提出的方法测量得到的砂轮圆弧半径代入公式(5)中,计算得到非球面平行磨削砂轮运动控制点三维坐标(X_o, Y_o, Z_o),并将其输入超精密磨床,控制机床做精确运动,对该非球面进行磨削加工。加工完成后,使用经干涉仪对标且检测精度优于 $1 \mu m$ 的自主研发的非接触面形检测系统,测量非球面面形,检测结果如图 18,存在较明显的圆柱形误差, P-V 值为 $9.27 \mu m$ 。

通过本文提供的方法获得的砂轮关键参数,计算砂轮运动控制点坐标,并进行非球面磨削,最终面形检测结果如图 19。元件的面形误差中,基本没有因砂轮几何尺寸误差而导致的圆柱形、球形或马鞍形低频误差部分,面形 P-V 值 $4.62 \mu m$, RMS 值优于 $0.7 \mu m$ 。使用非接触面形检测系统,测量磨削后的非球面参考中心点与元件几何中心点之间的位置偏差, X 向和 Y 向均小于 $0.05 mm$ 。利用 Taylor Hobson PGI 1250 轮廓仪测量非球面表面沿磨削方向的小尺度波纹,如图 20 所示,波纹幅值约 $2 \mu m$,与砂轮圆周跳动误差一致。

6 结 论

本文针对大口径非球面光学元件超精密平行磨削加工对圆弧金刚石砂轮形状误差高效精密测量的需求,提出了采用螺旋式轨迹对砂轮表面形貌进行连续扫描测量的方法,并建立扫描路径数学模型,对测量数据进行插值重构,得到圆弧砂轮表面三维形貌数据。根据非球面平行磨削加工特点,提出了非球面磨削圆弧砂轮几何形状精度评价指标,通过对砂轮表面三维形貌数据进行圆弧拟合与误差分离,获得圆弧砂轮平均圆弧半径及

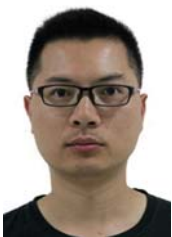
其波动极差、砂轮表面圆弧的圆度误差、圆跳动误差和轮廓圆心轴向偏差等重要评价参数。对某一型号的圆弧砂轮开展测量实验,获得了该砂轮的三维几何形貌,进行圆弧拟合后得到平均圆弧半径为 55.442 3 mm,半径波动极差为 0.16 mm,中央±8 mm 环带范围内圆弧的圆度误差约 5 μm,单一位置处圆跳动误差约 2 μm,轮廓圆心轴向偏差相对量约为 0.008 mm。进行大口径复杂非球面元件的磨削加工实验,面形 P-V 值达到 4.62 μm,RMS 值优于 0.7 μm,验证了该方法的可行性,测量效率与精度满足工程实际需求。

参考文献:

- [1] 李圣怡,戴一帆. 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, DAI Y F. *New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-Scale Aspheric Surfaces* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 殷龙海,王孝坤,李龙响,等. 大口径 SiC 离轴非球面的高效磨削加工[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2497-2505.
YIN L H, WANG X K, LI L X, *et al.*. Fast grinding of large SiC off-axis aspheric surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2497-2505. (in Chinese)
- [3] GUO Y B, CHEN B K, ZHANG Y, *et al.*. Research on parallel grinding method of non-axisymmetric aspheric lens[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 17(1): 149-151.
- [4] 张宁宁,王振忠,潘日,等. 平行磨削非轴对称非球面光学元件表面形貌[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1391-1395.
ZHANG N N, WANG ZH ZH, PAN R, *et al.*. Surface topography of parallel grinding process for nonaxisymmetric aspheric lens [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1391-1395. (in Chinese)
- [5] 周旭光,阎秋生,孔令叶,等. 砂轮几何参数对非球面轨迹包络磨削的影响研究[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 23-26.
ZHOU X G, YAN Q SH, KONG L Y, *et al.*. Effect of wheel geometry parameters in grinding aspheric with AEGM[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(8): 23-26. (in Chinese)
- [6] 柯晓龙,林晓辉,王健,等. 圆弧砂轮修整评价及非球面磨削误差补偿技术[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 187-191.
KE X L, LIN X H, WANG J, *et al.*. Evaluation of cup-wheel truing and error compensation in aspheric grinding [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4):044102. (in Chinese)
- [7] 林晓辉,马凯威,黄海滨,等. 轴对称非球面磨削表面粗糙度和波纹度的分布特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 092013.
LIN X H, MA K W, HUANG H B, *et al.*. Distribution characteristics of surface roughness and waviness error in axisymmetric aspheric grinding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(9): 092013. (in Chinese)
- [8] MCDONALD A, BAUER R, WARKENTIN A. Design and validation of a grinding wheel optical scanner system to repeatedly measure and characterize wheel surface topography[J]. *Measurement*, 2016, 93: 541-551.
- [9] MCDONALD A, MOHAMED A M O, WARKENTIN A, *et al.*. Kinematic simulation of the uncut chip thickness and surface finish using a reduced set of 3D grinding wheel measurements[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 169-178.
- [10] 崔长彩,余卿,张遂,等. 金刚石砂轮表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3167-3174.
CUI CH C, YU Q, ZHANG A, *et al.*. Measurement system of surface topography for diamond grinding wheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3167-3174. (in Chinese)

- [11] 李瑞旭, 崔长彩, 王爽, 等. 基于粒子群优化算法的砂轮三维形貌匹配[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 265-270.
LI R X, CUI CH C, WANG SH, *et al.*. 3D topography matching of diamond grinding wheel based on particle swarm optimization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(11): 265-270. (in Chinese)
- [12] 杜晗, 陈根余, 周聪, 等. 光纤激光在线整形金刚石砂轮检测系统设计[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 930-934.
DU H, CHEN G Y, ZHOU C, *et al.*. Design of detection system of fiber laser online shaping diamond wheel[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(6): 930-934. (in Chinese)
- [13] 柯晓龙, 刘建春, 黄海滨. 圆弧金刚石砂轮精密在位检测系统设计[J]. 厦门理工学院学报, 2013, 21(3): 21-25.
KE X L, LIU J CH, HUANG H B. Research on precision on-machine measuring technology for arc diamond wheel[J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 2013, 21(3): 21-25. (in Chinese)
- [14] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1939-1947.
LI B, SUN B, CHEN L, *et al.*. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)
- [15] 毕超, 房建国, 刘京亮, 等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 678-685.
BI CH, FANG J G, LIU J L, *et al.*. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 678-685. (in Chinese)
- [16] 彭希锋, 陈爽, 李海星, 等. 几何功能约束最小二乘法双短圆弧检测[J]. 中国测试, 2016, 42(9): 36-40, 45.
PENG X F, CHEN SH, LI H X, *et al.*. A measuring method for double short circular arcs based on least square fitting method with geometric usage constraint [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(9): 36-40, 45. (in Chinese)
- [17] 周京博, 李增强, 王亚奇, 等. 微圆弧金刚石刀具刀尖圆弧的测量及评价[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(4): 334-340.
ZHOU J B, LI Z Q, WANG Y Q, *et al.*. Tool tip arc measurement and characterization of micro-arc diamond tools[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(4): 334-340. (in Chinese)

作者简介:



周 炼(1987—),男,四川宜宾人,工程师,2009年于四川大学获得学士学位,主要从事光学元件超精密加工技术方面的研究。E-mail: zhouyinglianli@foxmail.com



安晨辉(1981—),男,山西晋中人,博士,副研究员,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事超精密加工设备动态特性分析研究工作。E-mail: hplaser@126.com