

# 基于条纹反射的超精密车削反射镜的在位面形检测

邵山川<sup>1,2</sup>, 陶小平<sup>1</sup>, 王孝坤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对单点金刚石车削金属反射镜的加工检测迭代周期较长的问题, 引入了动态范围大、检测速度快的条纹反射法, 实现了对金属反射镜的在位面形检测, 提高了制造效率。对条纹反射面形检测原理进行了研究, 通过光线追迹程序对口径为 100 mm 的反射镜面进行了模拟仿真, 分析了条纹反射在位面形检测系统完成微米级面形检测时的位姿标定需求; 对口径为 100 mm 的凹球面金属反射镜进行了在位检测, 测量精度优于 1  $\mu\text{m}$ 。研究结果对单点金刚石车削反射镜的加工提供了参考。

**关键词** 测量; 条纹反射; 金刚石车削; 在位面形检测; 位姿误差

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071203

## On-Machine Surface Shape Measurement of Reflective Mirrors by Ultra-Precision Turning Based on Fringe Reflection

Shao Shanchuan<sup>1,2</sup>, Tao Xiaoping<sup>1</sup>, Wang Xiaokun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As for the problem of long machining and measurement iteration cycle of metal reflectors by the single point diamond turning, the fringe reflection method with a large dynamic range and fast detection speed is introduced, and the on-machine surface measurement of metal reflectors is realized, which improves the manufacturing efficiency. The mechanism of surface shape measurement based on fringe reflection is investigated. By the ray tracing program, the simulation is conducted as for the reflector surface with an aperture of 100 mm and the micron-sized requirement of position calibration in the fringe reflection on-machine surface shape measurement system is analyzed. The on-machine measurement of concave spherical metal reflectors with an aperture of 100 mm is carried out, and the measurement precision is superior to 1  $\mu\text{m}$ . This research provides a certain reference for the machining of reflector by the single point diamond turning.

**Key words** measurement; fringe reflection; diamond turning; on-machine surface shape measurement; position errors

**OCIS codes** 120.4290; 120.4630; 120.5700; 120.6650

## 1 引言

单点金刚石车削技术是一种高效的超精密加工手段, 其利用计算机控制超精密数控机床和单晶金

刚石刀具完成对工件的车削加工, 目前已被广泛应用于反射镜加工制造领域<sup>[1]</sup>。但由于超精密加工零件的质量往往受其表面面形的限制, 多数反射镜在车削加工时并非一次成形, 一般需经历加工、拆卸检

收稿日期: 2018-01-11; 收到修改稿日期: 2018-01-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605202)、国家自然科学基金国际合作项目(61210015)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC038-02)

作者简介: 邵山川(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事条纹反射面形检测技术方面的研究。E-mail: wfhtssc@163.com

导师简介: 王孝坤(1980—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学超精密加工和检测技术方面的研究。

E-mail: jimwzk@sohu.com(通信联系人)

测、再加工的过程,加工检测的迭代周期长;同时,拆装过程费时费力,降低了加工效率。在位检测能够有效避免拆卸搬运及重新装配产生的误差影响,降低精度损失。车削完成后对反射镜进行在位检测时,不改变超精密金刚石车床刀具与车削镜组成的加工坐标系,可避免再加工时刀具重复对准的耗时问题,缩短车床加工检测的周期,提高车床的制造效率。因此亟需为超精密单点金刚石车削加工提供一种可行的在位面形检测技术。

针对光学反射镜的面形检测技术主要有接触式轮廓检测技术及非接触式三维面形测量技术<sup>[2-3]</sup>。在超精密车削镜在位检测的应用方面,接触式轮廓仪的测量采样密度低,机械结构复杂,扫描检测时间较长;非接触式干涉仪的检测速度快且测量精度高,但其动态范围小,一般需配合光学补偿器件使用,光路复杂。因此这两种检测方法都不适用于超精密车削镜面形的在位检测。而条纹反射检测技术<sup>[4]</sup>无需补偿元件及复杂的光路调整,仅需采集分析序列的条纹图像即可获得全口径面形,其抗干扰性强、动态范围大且设备结构简单,可很好地契合单点金刚石车床,实现对车削反射镜面形的在位检测。

关于条纹反射法测量精度方面的研究,Bothe等<sup>[5]</sup>从理论上解算出条纹反射测量的矢高分辨率可达亚纳米量级,并通过测量50 mm口径的平面镜得到了峰-谷值为15 nm的检测结果。Su等<sup>[6-8]</sup>基于传统的条纹反射检测原理,利用软件可调式光学检测系统(SCOTS),测量130 mm离轴抛物面时得到了均方根值为1 μm的检测结果。国内四川大学与成都光电所<sup>[9-11]</sup>、南京理工大学<sup>[12]</sup>等单位都对条纹反射测量法有一定研究,并且利用该方法测量了金属表面<sup>[13-14]</sup>、小口径镜面<sup>[10]</sup>等。其中四川大学的唐燕等<sup>[11]</sup>测量40 mm口径、180 mm曲率半径的凹面镜时,得到的结果和精度为微米量级的三坐标机的相当。本文提出了通过条纹反射法对超精密金刚石车削反射镜进行在位面形检测的方法,既大幅提高了机床的制造效率,又避免了拆装镜体导致的装配误差,使车削面形更快收敛,对利用超精密单点金刚石车削机床实现快速微米级面形加工提供了参考。

## 2 条纹反射检测原理

条纹反射法基于简单的光线反射原理,类似于光逆向传播的Hartmann检测<sup>[15]</sup>,示意图如图1所示, $xyz$ 为检测坐标系。

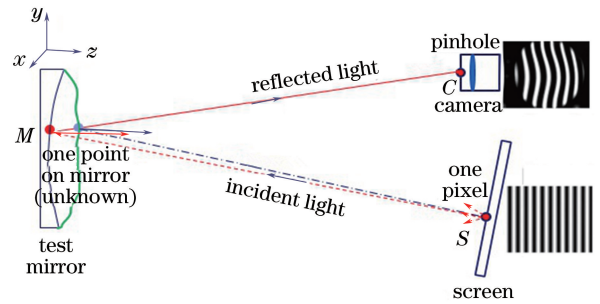


图1 条纹反射检测原理的示意图

Fig. 1 Schematic of fringe reflection measurement principle

检测系统包括屏幕、小孔相机和待检镜面。计算机控制屏幕生成一幅信息已知的条纹图像,利用相机拍摄采集经待检反射面调制后的图像,进行图像处理后可以得到待检镜的表面斜率信息,进而计算得出表面面形分布。简单来说,屏上一亮点 $S$ 经待检镜面反射后经过相机的光心 $C$ ,即小孔处,并成像在像面上形成一个亮斑。由反射定律可知,镜面反射点 $M$ 处的法线方向即为此点对应光路中入射光线与反射光线夹角的角平分线方向。对于屏幕上镜面成像区域中的任一組光线,在已知屏幕发光点、该点对应的镜面反射点以及相机光心的位置坐标后,可得到镜面反射点处的斜率信息 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ <sup>[16]</sup>分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_x(x_m, y_m) = \frac{\frac{x_m - x_s}{d_{m2s}} + \frac{x_m - x_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2c}}} \\ \omega_y(x_m, y_m) = \frac{\frac{y_m - y_s}{d_{m2s}} + \frac{y_m - y_c}{d_{m2c}}}{\frac{z_{m2s} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2s}} + \frac{z_{m2c} - \omega(x_m, y_m)}{d_{m2c}}} \end{array} \right. , \quad (1)$$

式中 $x_m$ 和 $y_m$ 为待检镜表面的坐标,可以通过对相机成像进行校准得到; $x_c$ 和 $y_c$ 为相机坐标, $x_s$ 和 $y_s$ 为屏幕亮点的坐标,均通过标定和测量得到; $z_{m2s}$ 和 $z_{m2c}$ 分别为待检镜与屏幕和相机之间的 $z$ 坐标差值, $d_{m2s}$ 和 $d_{m2c}$ 分别为待检镜与屏幕和相机之间的距离,也依靠对系统的标定和测量得到。

除以上可以计算或测量得到的参数外,(1)式中仍含有待求的面形函数 $\omega(x, y)$ ,在计算斜率时可提供合适的初始面形估计,通过反复迭代计算斜率并重构面形,直到满足迭代终止要求,最终输出被检面形。

条纹反射检测中的条纹编码方式有多种,其中

正弦条纹反射检测使屏幕显示正弦条纹,能起到对屏幕像素点进行编码的作用,实现屏幕像素点和镜面像素点的一一对应<sup>[17]</sup>。在屏幕上分别显示横向和纵向正弦分布的条纹,用相机记录经待检面反射的正弦条纹像,通过数字相移<sup>[18]</sup>、相位展开技术<sup>[19]</sup>得到相位分布,由此进行光线追迹,得到需要的像素点坐标并计算出其他物理参数,由(1)式计算待面上的斜率分布,最后通过基于 Zernike 多项式的模式法<sup>[20]</sup>来重构面形。重构面形可以用 Zernike 多项式线性组合表示为

$$\omega(x, y) = a_1 \cdot Z_1(x, y) + a_2 \cdot Z_2(x, y) + \dots + a_n \cdot Z_n(x, y) = \sum_{i=1}^n [a_i \cdot Z_i(x, y)], \quad (2)$$

式中  $Z_i(x, y)$  为 Zernike 多项式的第  $i$  项,  $a_i$  为该项对应的系数。利用(2)式分别对  $x, y$  求偏导可得 Zernike 斜率多项式为

$$\begin{aligned} \omega'_x(x, y) &= \sum_{i=1}^n \left[ a_i \cdot \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} \right], \\ \omega'_y(x, y) &= \sum_{i=1}^n \left[ a_i \cdot \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

此外,根据(1)式获得的斜率值  $\omega_x$  和  $\omega_y$ , 可以用矩阵表示 Zernike 斜率多项式系数  $a_i$  以及各项表达式,并建立(1)式与(3)式的对等关系,即

$$\mathbf{W} = \mathbf{AZ}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{W} = [\omega_x, \omega_y]^T$ ,  $\mathbf{A} = [a_i]^T$ ,  $\mathbf{Z} = \left[ \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \right]^T$ ,  $T$  代表转置。利用最小二乘法对(4)式求解,通过  $\mathbf{A} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} (\mathbf{Z}^T \mathbf{W})$  (其中  $-1$  代表求逆)可求得除平移项  $a_0$  外的 Zernike 多项式系数,  $a_0$  不影响面形形状,故可不考虑,将系数  $a_1, a_2, \dots, a_n$  代入(2)式可得到重构面形。

### 3 条纹反射在位面形检测系统的位姿标定及误差源分析

条纹反射法解算的重点是由(1)式求解待检面上各采样点处的斜率,故检测精度很大程度上依赖于系统物理位置测量的准确程度,即屏幕、小孔相机和待检镜统一到全局坐标系的精度<sup>[21]</sup>。

整个系统标定过程可分为相机的标定及屏幕入射光线的标定两大部分。其中相机的标定即相机反射光线的标定,包括相机内外参数的标定与空间位置的标定。对于内外参数的标定,张正友<sup>[22]</sup>提出的平面标定法已比较成熟。对于相机空间位置的标定,基于条纹反射检测原理的相机模型为小孔相机,

故实际中在相机镜头前安装小孔光阑,使小孔光阑的位置替代相机的空间位置,利用激光跟踪仪对小孔点进行定位从而完成相机空间位置的标定,小孔点与相机像面像素点的连线方向即为反射光线方向。相比于实际的相机镜头,小孔光阑可将入瞳处不同视场角的光线约束于一点,通过弱化渐晕效应使成像更清晰。

屏幕入射光线标定常用的方式有两种,一是基于相位测量偏折术测量原理的移动屏幕模型<sup>[23-24]</sup>,利用相机采集屏幕移动前后的两幅镜面反射图样,寻找相机像面某一像素点对应的两个位置在屏幕上的共相位点,两共相位点的连线即为入射光线方向;另一种是无需移动屏幕的基于光线追迹原理的预知面形模型,其利用数字相移与相位展开技术获取与相机像面像素点对应的屏幕像素点,根据预知面形模型解算相机像面像素点对应的被检镜面上的反射点,最后得到反射点与屏幕像素点的连线即为入射光线。入射光线标定中最重要的一步是寻找镜面反射点。对于某待检镜,其理想面形可表示为

$$z = \frac{s^2/r}{1 + [1 - (k+1)(s/r)^2]^{1/2}} + A_4 s^4 + A_6 s^6 + \dots, \quad (5)$$

式中  $s^2 = x^2 + y^2$ ;  $k$  为二次曲面系数;  $r$  为顶点曲率半径( $k=0$  时面形为球面,  $r=\infty$  时面形为平面);  $A$  为非球面系数,依照不同的检测面形在计算时给定对应的初始估计。

小孔光阑坐标表示为  $(x_c, y_c, z_c)$ , 像面像素点坐标表示为  $(x_p, y_p, z_p)$ 。对被检镜位置进行测量定位后,利用标定得到反射光线方程,即

$$\frac{x - x_c}{x_p - x_c} = \frac{y - y_c}{y_p - y_c} = \frac{z - z_c}{z_p - z_c} = t. \quad (6)$$

联立(5)、(6)式得到的解为被检镜面反射点的坐标,即为(1)式中的  $(x_m, y_m, \omega)$ 。

对于屏幕位置的标定,选择的方法是通过控制屏幕显示合适数量的像素亮点阵列,利用激光跟踪仪完成对屏幕像素亮点的定位,从而给出屏幕坐标  $(x_s, y_s, z_s)$ 。

上述过程得到的数据包含屏幕、小孔相机和待检镜的空间位置坐标,处理后代入(1)式,再基于 Zernike 模式法<sup>[20]</sup>重构面形图样。在这一过程中,对相机、待检镜及屏幕位置的标定精度直接影响小孔点、镜面反射点及屏幕像素点的坐标准确性,从而进一步影响待检镜面反射点处的斜率数据及重构面形。因此,系统位姿标定误差主要考虑各部件的物

理位置测量误差,包括屏幕相对相机的偏角误差、相机偏移误差及待检镜定位误差三类误差来源。对于屏幕的标定与测量,要确定整个面在空间中的位置,实际测量时屏幕位置与理想位置的偏差表现为屏幕相对相机的偏角误差,绕某轴向的偏角误差同时会对屏幕坐标的坐标值产生影响;进行小孔相机位置的测量时,小孔坐标作为确定相机空间位置的主要参数,易引入相机的相对位置平移误差;待检镜作为条纹反射在位面形检测系统的被检测部分,测量中镜面的倾斜信息会由相机拍摄的图片反映,可在图像处理过程中得到,在整个检测系统的坐标系下,只分析待检镜在三个轴向引入的位置测量偏差,某轴向的位置测量偏差只引起该方向上坐标值的改变。

以口径为 100 mm、曲率半径  $R=1000$  mm 的凹球面反射镜为例,其面形公式为  $z=1000-\sqrt{1000-x^2-y^2}$ ,利用光学软件 Code V 建立单点金刚石车削机床在位面形检测结构的光线追迹模型,将该面形检测结构简化为数学问题进行计算。检测光路为一般的反射光路,如图 2 所示。根据光线追迹模型得到理想无误差状态下屏幕、相机及反射镜面上各采样点的物理位置坐标,通过解算镜面各采样点处的斜率并进行面形重构,得到重构面形与标准球面面形的残差,如图 3 所示。

图 3 结果显示,在排除物理位置标定误差的理想情况下,检测面形残差结果的均方根(RMS)约为  $3.0 \times 10^{-11}$   $\mu\text{m}$ ,说明面形重构算法的准确度较高。结合实际情况需使用激光跟踪仪对各部分进行位置标定与测量的情况,仪器的测量精度优于

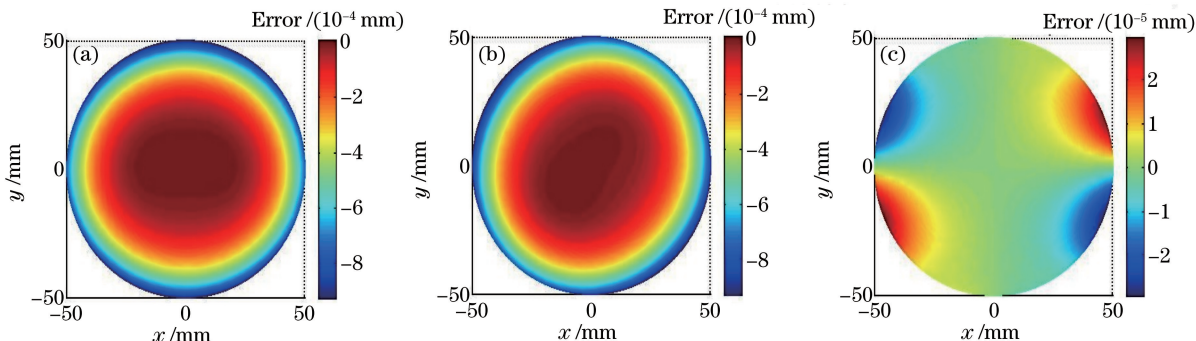


图 4 屏幕相对角度误差的仿真结果。(a)绕  $x$  轴偏角  $0.1^\circ$ ;(b)绕  $y$  轴偏角  $0.1^\circ$ ;(c)绕  $z$  轴偏角  $0.1^\circ$

Fig. 4 Simulation results of relative angle errors of screen.

(a)  $0.1^\circ$  of  $x$ -axis offset; (b)  $0.1^\circ$  of  $y$ -axis offset; (c)  $0.1^\circ$  of  $z$ -axis offset

分析结果显示,三个轴上的偏角误差引入的面形误差主要为低阶像差,其中绕  $x$  与  $y$  轴的偏角误差对检测结果的影响程度相近,主要表现为离焦; $z$  轴偏角误差的影响程度较小,表现形式与其他两轴

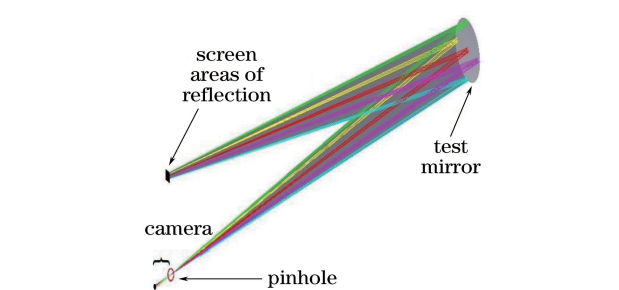


图 2 条纹反射在位检测系统的仿真光路

Fig. 2 Simulation optical path of on-machine measurement based on fringe reflection

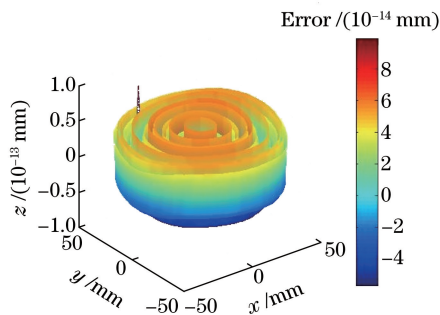


图 3 理想检测下的面形残差图

Fig. 3 Residual plot of surface shape in ideal situation

$100 \mu\text{m}$ ,据此给定引入标定误差的大小,对三类位姿标定进行误差分析。

对于屏幕的标定与测量,根据理想仿真模型,镜面中心的法线方向为坐标系的  $z$  轴,屏幕指向相机的方向为  $y$  轴。结合仿真时屏幕的尺寸与实际仪器的测量精度,分析时引入屏幕绕  $xyz$  轴  $0.1^\circ$  的角度偏转,进行仿真分析得到面形检测残差的结果,如图 4 所示。

的不同,主要为像散。总的来说, $0.1^\circ$  的屏幕定位的偏角误差即会对检测结果产生微米级左右的影响,因此需要严格控制对屏幕位姿的标定。

在分析相机位置的测量误差时,在  $xyz$  方向引

入偏移误差量为  $100\ \mu\text{m}$ , 对面形检测残差的结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 相机在  $x$ 、 $y$  向的偏移误差对面形残差的影响程度也较为相近, 但  $y$  向偏移误差多引入了离焦项;  $z$  向误差相比  $x$ 、 $y$  向影响程度

稍大, 离焦是其主要的误差表现形式。相机标定时的位置偏移误差对面形残差的影响主要表现为像散与离焦像差, 同样属于低阶像差, 总体上相机定位的偏移误差对最终检测结果的影响较小, 标定要求较为宽松。

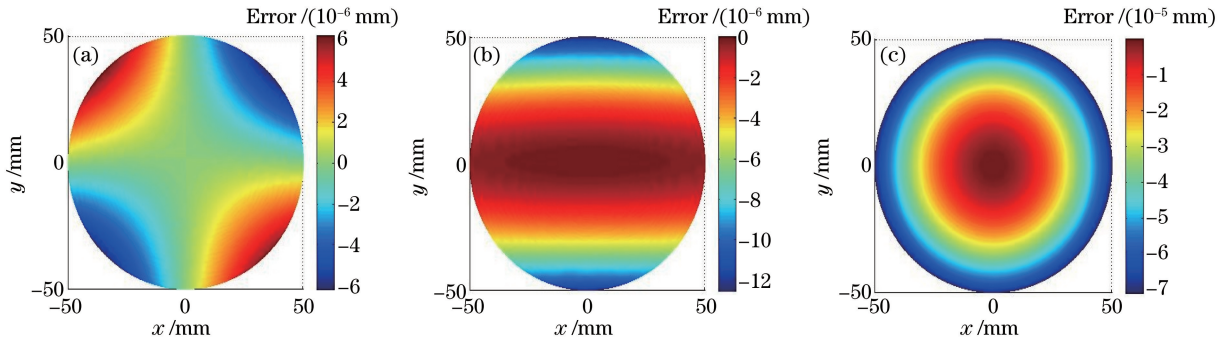


图 5 相机相对偏移误差的仿真结果。(a)  $x$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$ ; (b)  $y$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$ ; (c)  $z$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Simulation results of relative offset errors of camera.

(a)  $100\ \mu\text{m}$  of  $x$ -axis offset; (b)  $100\ \mu\text{m}$  of  $y$ -axis; (c)  $100\ \mu\text{m}$  of  $z$ -axis offset

反射镜作为条纹反射在位面形检测系统的被检测部分, 其定位准确性对面形检测残差的影响如图 6 所示。

图 6 结果显示, 被检镜的  $z$  向测量误差对检测结果的影响程度相比  $x$ 、 $y$  向的在峰-谷值上大了两个数量级,  $x$ 、 $y$  两方向的误差对检测结果残差

的影响表现为不同向的彗差; 与相机定位偏移误差相比, 镜体与相机的  $z$  向定位偏移误差的影响均较大, 这也说明了面形检测结果对光轴方向的偏移误差较敏感, 在进行位姿标定时要更加仔细。总体上, 被检镜三个方向的标定误差仍主要表现为低阶像差。

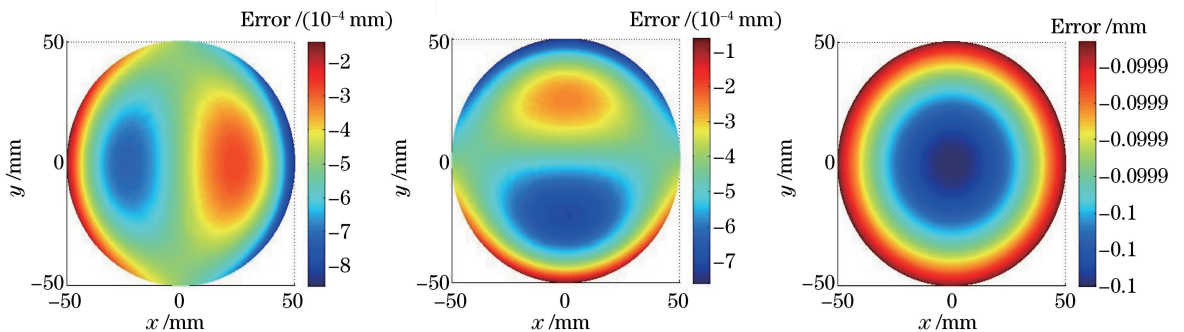


图 6 被检镜位置测量误差的仿真结果。(a)  $x$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$ ; (b)  $y$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$ ; (c)  $z$  轴向偏差  $100\ \mu\text{m}$

Fig. 6 Simulation results of position measurement errors of tested mirror.

(a)  $100\ \mu\text{m}$  of  $x$ -axis offset; (b)  $100\ \mu\text{m}$  of  $y$ -axis offset; (c)  $100\ \mu\text{m}$  of  $z$ -axis offset

除各类误差对检测结果的偏差大小有影响外, 误差对残差面形的具体影响见表 1, 其中 B 表示低阶离焦量, Q 表示低阶像散量, D 表示低阶彗差量。

综合以上误差分析结果可知, 在条纹反射在位面形检测系统中, 位姿标定误差对检测结果面形残差的影响主要表现为低阶像差。屏幕角度偏差对检测结果的影响程度较大, 主要表现为低阶的离焦像差, 说明需要提高对屏幕的标定要求; 而相机与待检镜的标定误差对检测结果的影响较小, 相应的位姿

标定要求较宽松, 但要注意光轴方向的定位准确度, 应多次定位取均值来抑制光轴方向偏移误差的影响。在分析结果中, 除倾斜项外, 对面形误差影响比较大的像差为离焦项。在多数光学检测中, 倾斜量与离焦量是两个可调整的低阶像差量, 不考虑低阶倾斜像差的影响, 若要检测精度(峰-谷值)达到微米量级, 标定测量精度应达到百微米量级; 若离焦项影响也可剔除, 则标定测量精度要求能够放宽到毫米量级。

表 1 凹球面反射镜的位姿误差分析表

Table 1 Position error analysis table of concave spherical reflector

Error category	RMS of residual error / $\mu\text{m}$		
	B	Q	D
0.1° of $x$ -axis offset (screen)	$2.489687287737 \times 10^{-1}$	$2.908146299923 \times 10^{-2}$	$3.979920831153 \times 10^{-3}$
0.1° of $y$ -axis offset (screen)	$2.483736742539 \times 10^{-1}$	$3.089535644723 \times 10^{-2}$	$4.872532284522 \times 10^{-3}$
0.1° of $z$ -axis offset (screen)	$3.481779043344 \times 10^{-5}$	$5.472401813738 \times 10^{-3}$	$1.896935288569 \times 10^{-4}$
0.1 mm of $x$ -axis offset (camera)	$6.291991034222 \times 10^{-7}$	$1.899253479616 \times 10^{-3}$	$7.124433673263 \times 10^{-5}$
0.1 mm of $y$ -axis offset (camera)	$1.911075158754 \times 10^{-3}$	$1.904924042855 \times 10^{-3}$	$7.204148793529 \times 10^{-5}$
0.1 mm of $z$ -axis offset (camera)	$2.124997950814 \times 10^{-2}$	$2.530253986902 \times 10^{-4}$	$3.062183538854 \times 10^{-5}$
0.1 mm of $x$ -axis offset (mirror)	$2.261439248562 \times 10^{-5}$	$1.269188565282 \times 10^{-5}$	$1.195176600554 \times 10^{-3}$
0.1 mm of $y$ -axis offset (mirror)	$2.480388066268 \times 10^{-4}$	$1.371468605605 \times 10^{-5}$	$1.185302270680 \times 10^{-3}$
0.1 mm of $z$ -axis offset (mirror)	$3.975585121739 \times 10^{-2}$	$3.325687586919 \times 10^{-4}$	$7.569519908300 \times 10^{-6}$

## 4 实 验

为验证条纹反射在位面形检测系统的可行性及标定后的实际检测精度,分别以分辨率为  $2160 \text{ pixel} \times 3840 \text{ pixel}$  的显示屏幕及镜头焦距为  $50 \text{ cm}$ 、像面分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$  的定焦相机作为超精密金刚石车床条纹反射在位面形检

测系统的条纹显示设备及图像条纹采集设备,二者使用固定结构连接在一起并安装在单点金刚石车削机床中加工镜位置的右侧,整体检测系统如图 7 所示。系统所检测对象为一块口径为  $100 \text{ mm}$ 、曲率半径  $R=1000.25 \text{ mm}$  的面形精度较高的凹球面金属反射镜,对其进行干涉检测的结果如图 8 所示,光源波长为  $632.8 \text{ nm}$ 。

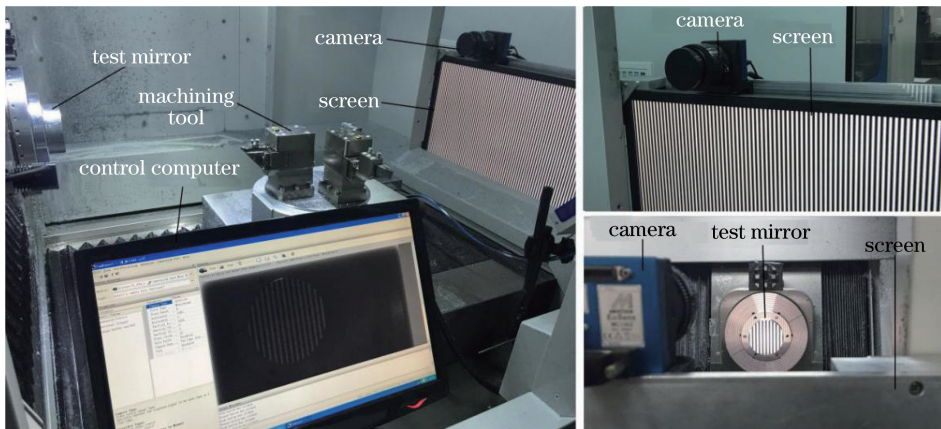


图 7 条纹反射在位面形检测系统中的装置图

Fig. 7 Fringe reflection setup in on-machine surface measurement system

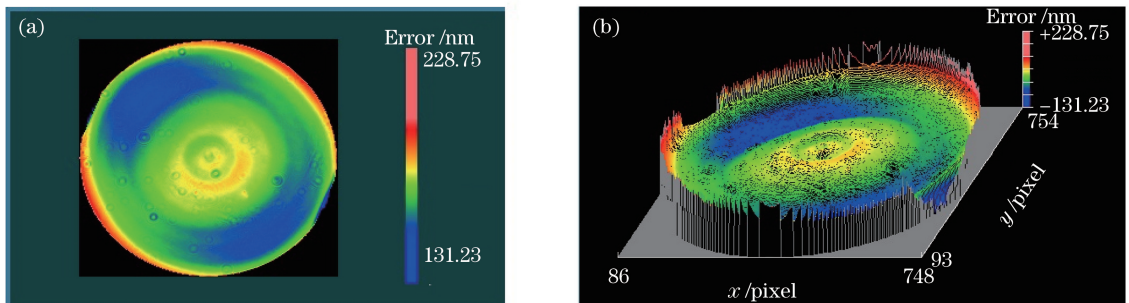


图 8 干涉检测残差结果。(a)二维;(b)三维

Fig. 8 Residual error results of interference measurement. (a) Two-dimension; (b) three-dimension

在将屏幕与相机连接固定前,先通过三坐标测量仪完成了屏幕自身像素点位置的标定,并通过标定板完成相机自身的标定。检测部分安装完成后,使用激光跟踪仪建立检测坐标系,并进行整个在位检测系统的全局空间位置标定及测量<sup>[25-26]</sup>,再通过坐标变换统一加工检测坐标系。检测时,高质量的反射条纹会在

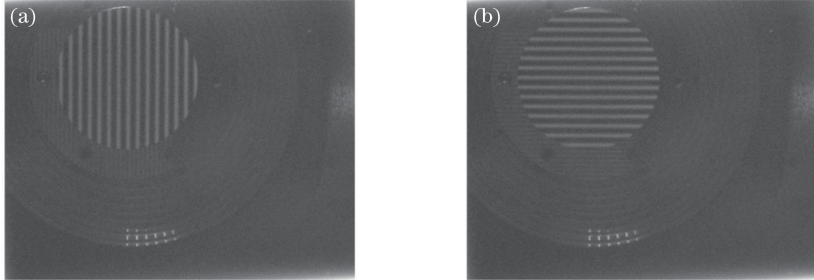


图9 相机所采集的镜面反射条纹分布。(a)水平方向正弦分布的条纹;(b)垂直方向正弦分布的条纹

Fig. 9 Distributions of reflection fringes collected by camera.

(a) Sinusoidal fringe in horizontal direction; (b) sinusoidal fringe in vertical direction

通过对相机采集的镜面反射图样进行图像处理得到镜面区域。镜面区域确定后对该区域的图片信息进行处理,通过数字相移优化算法<sup>[28]</sup>以及相位展开得到相位结果,如图10所示。利用同相位建立屏幕像素点、相机像面像素点以及镜面反射点的映射关系,同时利用坐标系转换将三者的位置信息转换到检测系统所使用的全局坐标系中,至此,完成了从图像信息转化为坐标信息的过程。将得到的物理坐标信息代入(1)式,利用基于Zernike多项式的模式法进行面形重构,直到满足迭代要求输出最终的重构面形,如图11所示。再

一定程度上减弱屏幕显示非线性的影响<sup>[27]</sup>,相机通过外接计算机将已知周期数的正弦条纹图像生成于屏幕,实验使用条纹周期数为50,利用数字相移技术分别显示水平与垂直两个方向正弦分布的相位差为 $\pi/2$ 的两组共八幅正弦条纹,相机依次拍摄保存八幅条纹的镜面反射图,采集图样如图9所示。

计算该面形与被检面理想面形的残差并进行Zernike多项式圆域展开<sup>[29]</sup>,去除多项式前四项常规调整量后的面形残差结果如图12所示。受激光跟踪仪标定精度的限制,检测结果中存在部分标定误差。实验检测结果与干涉检测结果相比,RMS值偏差为 $0.089\ \mu\text{m}$ ,误差表现形式为像散,结合位姿误差分析表1结果可知,引起较大像散误差的误差源为屏幕角度误差,其中 $x$ 、 $y$ 轴向的偏角误差是引起检测结果中像散误差的主要原因。但对于金刚石车床加工的初期测试,在位面形检测方法满足使用需求。

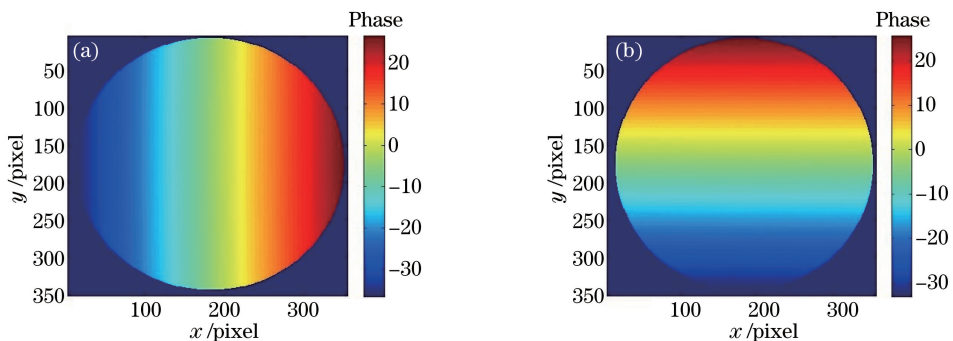


图10 相位展开图。(a)水平方向;(b)垂直方向

Fig. 10 Phase unwrapping. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

综上所述,条纹反射在位面形检测方法的面形检测精度(峰-谷值)优于 $1\ \mu\text{m}$ ,验证了条纹反射法作为单点金刚石车削机床的在位面形检测方法的可行性,这对加工面形精度为微米级的超精密金刚石车削的前期加工提供了参考。

## 5 结 论

将条纹反射检测技术集成于单点金刚石车削机床,实现了被加工反射镜的在位面形检测,缩短了加工时间,提高了车床制造效率。该方法无需复杂

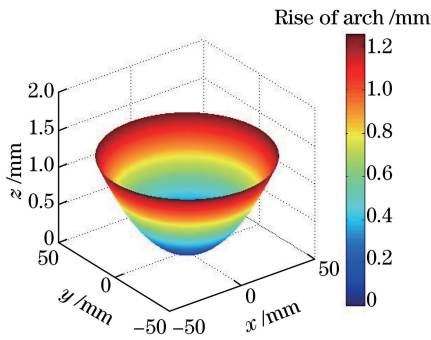


图 11 面形重构图

Fig. 11 Reconstruction of surface shape

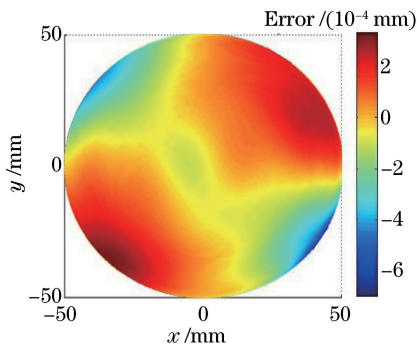


图 12 条纹反射在位检测的面形残差图

Fig. 12 Residual error plot of fringe reflection on-machine surface shape measurement

的光路及设备简单,在确定各部件准确的坐标关系后,利用车床自带的高精度机械结构可实时了解待检镜的精确位置,不需对移动的镜体重复定位。另外,通过建立标定及面形重构理论模型,分别进行了模拟仿真及实际的在位面形测量,微米级的检测结果表明条纹反射法作为单点金刚石车削机床的在位反射镜面形检测方法具有可行性。为了扩大该在位检测方法的使用范围,提高检测精度,下一步将改善标定方法,并进行实验验证。

### 参 考 文 献

- [1] Kang Z, Nie F M, Liu J S, *et al.* Research on single point diamond precision numerical control turning technique and its development [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(2): 163-167.  
康战, 聂凤明, 刘劲松, 等. 单点金刚石精密数控车削加工技术及发展前景分析[J]. *光学技术*, 2010, 36(2): 163-167.
- [2] Wang Y H, Su P, Parks R E, *et al.* Swing arm optical coordinate-measuring machine: High precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 073603.
- [3] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [4] Xiao Y L, Xue J P, Su X Y. Robust self-calibration three-dimensional shape measurement in fringe-projection photogrammetry [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 694-696.
- [5] Bothe T, Li W S, von Kopylow C, *et al.* High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- [6] Su P, Parks R E, Wang L R, *et al.* Software configurable optical test system: A computerized reverse Hartmann test [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [7] Huang R, Su P, Horne T, *et al.* Optical metrology of a large deformable aspherical mirror using software configurable optical test system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 085106.
- [8] Su P, Khreishi M A H, Su T, *et al.* Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: A computerized reverse Hartmann test [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 031305.
- [9] Zhao W C, Fan B, Wu F, *et al.* Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112001.  
赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于PMD的反射镜面检测实验分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112001.
- [10] Tang Y, Su X Y, Hu S. Measurement based on fringe reflection for testing aspheric optical axis precisely and flexibly [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(31): 5944-5948.
- [11] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, *et al.* Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 965-969.  
唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 965-969.
- [12] Zhu R G, Zhu R H, Song Q, *et al.* Specular surface measurement based on fringe reflection and study on 3D shape reconstruction technique[J]. *Proceedings of*



- SPIE, 2013, 8769: 87692S.
- [13] Zhang Y B, Tang J, Yang D G. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(s1): 100-102.  
张于北, 唐佳, 杨党纲. 对某金属件反光表面缺陷的反射条纹检测[J]. *计测技术*, 2013, 33(s1): 100-102.
- [14] Song Y H, Wang Z, Fu L H, *et al.* Detection of surface defect on highly reflective curved surface using reflective fringe pattern[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(8): 1250-1254.  
宋宇航, 王仲, 付鲁华, 等. 一种高反射曲面表面缺陷的反射条纹检测方法[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(8): 1250-1254.
- [15] Zhang J P, Zhang X J, Zhang Z Y, *et al.* Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 492-499.  
张金平, 张学军, 张忠玉, 等. Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 492-499.
- [16] Su P, Parks R E, Wang L, *et al.* Software configurable optical test system: A computerized reverse Hartmann test[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [17] Yuan T. Study on fringe-reflection optical surface shape measurement technology for large aspheric mirror[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 28.  
袁婷. 基于条纹反射法的大口径非球面反射镜面形检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 28.
- [18] Hu E Y, He Y M, Chen Y M. Study on a novel phase-recovering algorithm for partial intensity saturation in digital projection grating phase-shifting profilometry [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(1): 23-28.
- [19] Malacara D. *Optical shop testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [20] Southwell W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1980, 70(8): 998-1006.
- [21] Wu Y X, Yang M, Pang Z P, *et al.* Structure of fringe reflection technique with low phase ambiguous error[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 575-580.  
吴雨祥, 杨眉, 潘志鹏, 等. 低多义性误差的条纹反射技术系统结构研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 575-580.
- [22] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [23] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.  
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212004.
- [24] Li C, Zhang X, Tu D W, *et al.* Deflectometry measurement method of single-camera monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012007.  
李晨, 张旭, 屠大维, 等. 单相机监控偏折术测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012007.
- [25] Burge J H, Su P, Zhao C, *et al.* Use of a commercial laser tracker for optical alignment [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6676: 66760E.
- [26] Liu L, Chen X D, Xiong L, *et al.* Angle error investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1104003.  
刘力, 陈新东, 熊玲, 等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1104003.
- [27] Yue H M, Li R, Pan Z P, *et al.* High quality fringe patterns captured from phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112004.  
岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 相位测量偏折术中高质量条纹的获取[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112004.
- [28] Ji Y, Zhang X J, Yuan T, *et al.* Deflectometry measurement system for smart mobile devices [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 267-279.  
冀翼, 张学军, 袁婷, 等. 用于智能移动设备的条纹反射法检测系统[J]. *中国光学*, 2017, 10(2): 267-279.
- [29] Zhao C, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part I: Basis set derived from gradients of Zernike polynomials[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18014-18024.