

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108451

基于激光对刀仪的高精度在位测量及补偿方法^{*}

陶宇轩, 刘秀峰, 曹海印

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 球型砂轮在位修整前后的直径变化将导致理想与实际的磨削轨迹之间出现位置偏差, 造成加工误差, 因此在超精密磨削加工前获取该变化信息是十分有必要的。针对于此, 提出了一种球型砂轮在位测量方案, 包括搭建基于激光对刀仪的在位测量系统以及设计在位测量步骤, 并针对该方案存在的系统误差进行分析, 抽象出了激光对刀仪安装误差模型, 结合齐次坐标变换推导了误差公式, 借助最小二乘法求解安装误差, 从而实现了测量数据的补偿与对球型砂轮的高精度在位测量。最后以12.5 mm半径的标准球做标定, 计算出误差角度值用作补偿, 再分别测量12.5 mm与3 mm标准球作为验证。实验表明该方案可将测量精度从4 μm 提高到1.2 μm 。

关键词: 超精密磨削; 激光对刀仪; 齐次坐标转换; 最小二乘法; 误差补偿

中图分类号: TH74 TG596 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.35

High precision on-site measurement and compensation method based on the laser tool presetter

Tao Yuxuan, Liu Xiufeng, Cao Haiyin

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The diameter change of the spherical grinding wheel after on-site dressing may lead to position deviation between ideal and actual grinding trajectory, which bring the machining error. Therefore, it is very necessary to obtain the change information before ultra-precision grinding. In view of this, this article proposes an on-site measurement scheme of the spherical grinding wheel, including the establishment of the on-site measurement system based on the laser tool presetter and on-site measurement steps design. The systematic error of this scheme is analyzed, the installation error model of laser tool presetter is abstracted, the error formula is deduced combined with homogeneous coordinate transformation, and the installation error is solved by the least square method. Therefore, the compensation of measurement data and high-precision on-site measurement of the spherical grinding wheel are realized. Finally, the standard ball with 12.5 mm radius is used for calibration, and the error angle value is calculated for compensation. Then, the 12.5 mm and 3 mm standard balls are measured for verification. Experimental results show that the measurement accuracy can be improved from 4 μm to 1.2 μm .

Keywords: ultra-precision grinding; laser tool presetter; homogeneous coordinate transformation; least square; error compensation

0 引言

航空、光学及电子等领域的发展对材料成型与加工提出了更高的要求, 诸如加工具有高表面光洁度、高成形精度和高表面完整性的硬脆性材料等精密车削难以实现的需求, 因此超精密磨削得到了更多的应用^[1-2]。超精密磨削常用方法有展成磨削法、垂直磨削法、平行磨削法和

法向磨削法^[3], 展成法不适用于自由曲面等复杂加工^[4], 垂直磨削法依靠砂轮截面圆弧顶点区域的磨粒去除材料^[5-6], 在凹面加工时被加工点最小曲率半径受砂轮直径限制^[7], 法向磨削法依靠多轴联动保证砂轮轴线与磨削点法向夹角不变, 对机床与数控系统要求较高。平行磨削法多通过砂轮球形截面包络出被加工表面, 提高了工件面形精度和砂轮的使用寿命, 降低了工件表面粗糙度及砂轮在半径方向上的磨损^[8]。结合机床构型与加工需

收稿日期: 2021-08-20 Received Date: 2021-08-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51875223)、国防基础科研核科学挑战专题(TZ2018006)项目资助

求,本文依托的超精密磨床选用平行磨削及球型砂轮作为磨削方案。

在加工过程中,若球型砂轮实际球半径与编程时砂轮球半径存在偏差,将导致实际磨削轨迹逐渐偏离理想磨削轨迹,造成轮廓误差。由于砂轮存在无法避免的砂轮磨损现象,本文方案依托的超精密磨床配备有在位修整装置,确保砂轮形貌精度的同时避免装拆时造成的安装误差^[9],但这将造成修整前后球型砂轮半径的变化,导致上述问题的出现。因此在位精确测量修整后球型砂轮半径是十分有必要的。

目前的研究大多针对砂轮表面形貌及磨损测量,母德强等^[10]采用液体差压技术和误差分离技术建立了砂轮状态与压力之间的关系,实现对于砂轮工作表面的磨损和钝化的实时在线测量。崔长彩等^[11]依托白光干涉原理及测量拼接技术,实现对砂轮局部磨粒的表面分析。Zhou 等^[12]借助超景深显微镜与图像处理分析砂轮磨损情况。Li 等^[13]基于 CCD 相机与远心背光源搭建了砂轮轮廓测量系统,辅以轮廓模板匹配与图像拼接技术,可实现对多种形状砂轮的精密测量。Xu 等^[14]借助机器视觉测量砂轮轮廓,并依托复刻模板验证该方案对砂轮磨损及修整精度在位测量的可靠性。而在激光的应用上大多针对激光测距,包括激光脉冲测距法、激光相位测距法和激光干涉测距法等^[15]。杜晗等^[16]搭建了一套光纤激光在线整形金刚石砂轮系统,在激光位移传感器测得表面轮廓后,利用光纤激光在线整形。陈锋等^[17]结合电动平台与激光三角法,基于聚焦激光照射到被测表面上会生成一个激光光斑的事实,通过测量相机上所成像的位置测得被测表面在激光束方向的距离^[18],从而获取砂轮表面各点高度信息,得到杯型砂轮表面形貌。张桥杰等^[19]利用双激光位移传感器对置安装实现在机测量砂轮直径,但安装要求较高,且无法获得砂轮球心坐标。综上,本文提出了一种基于激光对刀仪安装误差补偿的砂轮在位测量方法,可在补偿激光对刀仪的安装误差基础上,实现对球型砂轮轮廓的精确测量,本文具体表现在半径测量及获取球心坐标,用于指导后续的磨削轨迹规划。

文章第 1 节将介绍砂轮在位测量总体方案,包括在位测量系统结构和在位测量步骤。第 2 节将建立激光对刀仪安装误差模型,分析其对测量精度造成的影响,结合齐次坐标变换^[20]提出补偿算法。第 3 节通过相关实验验证该方法的可靠性。第 4 节总结本文所做工作。

1 砂轮在位测量方案

该方案基于自主研发的三轴联动超精密磨床进行开发。如图 1 所示,三轴联动超精密磨床具备有 X、Z 两个超精密闭式液体静压导轨,呈“T”型布局安装于天然大

理石平台之上,工件主轴与斜 15 度安装的磨削轴分别安装于 Z 轴、X 轴之上。主轴旁安装的在位修整系统由直线轴、回转轴及修整轴组成,如图 2 所示的激光对刀仪安装于工件主轴与修整系统之间,其发射端和接收端相对安装,发送端发送的激光将被接收端接收。激光束被遮挡时接收端接收到的激光强度下降,而遮挡逐渐减少时激光强度上升,此时若激光强度的变化越过了设定值,激光对刀仪将产生一个脉冲信号,代表着已遮挡或已离开遮挡物。

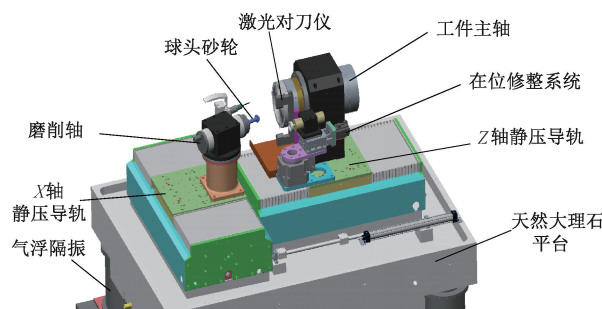


图 1 三轴联动超精密磨床三维模型

Fig. 1 The 3D model of three-axis ultra-precision grinder

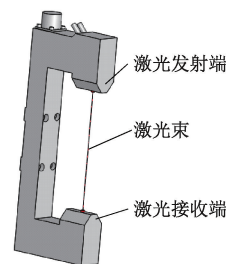


图 2 激光对刀仪

Fig. 2 Laser tool setter

根据激光对刀仪工作原理,本方案设计的球型砂轮在位测量系统结构简图如图 3 所示,主要包括作为位置传感器的 X、Z 轴的高精度光栅、负责数据采集的开放式数控系统 Power PMAC、充当高灵敏度触发装置的激光对刀仪。

具体采集步骤如下:

1) PMAC 控制 X、Z 轴沿预定轨迹移动,等待接收到激光触发信号。

2) 当激光束与砂轮球面相切时,激光对刀仪将因遮挡减少而产生触发信号,系统立即捕获当前 X、Z 轴位置信息作为触发点位置坐标。此时 PMAC 控制 X、Z 轴停止。

3) PMAC 更改目标点位置,控制 X、Z 轴朝下一个预定轨迹移动。

4) 重复上述步骤直至采集到足够的轮廓点,得到所需数据。

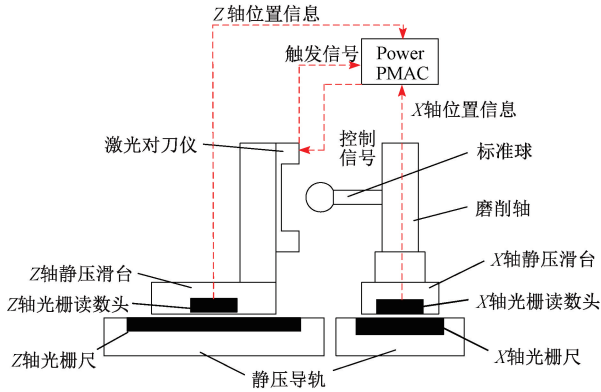


图 3 砂轮在位测量系统结构简图

Fig. 3 Structure diagram of the in-situ measurement system

2 误差分析及补偿

2.1 误差分析

在机床坐标系中任意采样点的空间坐标可表示为 (x_i, y_i, z_i) , 受限于在位测量系统无法测得采集点在机床坐标系中 y 坐标值大小, 采样点坐标表示为 $(x_i, 0, z_i)$, 等同于三维空间点向 xoz 平面做投影。当激光对刀仪的激光束垂直于机床 xoz 平面时, 投影变换不会造成图形变形, 可正确拟合出砂轮球半径和球心坐标。但由于基座安装平面本身存在误差, 且激光对刀仪仅靠螺钉固定在基座上, 实际中激光束呈一定角度斜着穿过 xoz 平面, 理论上将导致采集点沿激光束方向拉长成椭圆状。对采集数据点进行旋转并比例缩小后, 其结果等同于图 4 所示的竖直投影结果。将该误差角度分解为如图 5 所示的安装误差, 即 xoy 平面上激光对刀仪与 y 轴大小为 β 的夹角误差和 zoy 平面上激光对刀仪与 y 轴大小为 α 的夹角误差。

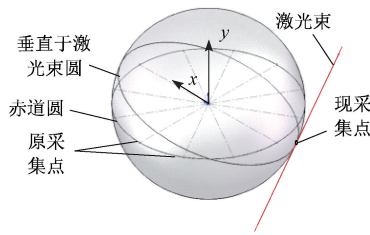


图 4 采集点变化

Fig. 4 Acquisition point change

由于夹角的存在, 激光束采集的点将分布于垂直激光束、包含球心的砂轮圆上, 具体如图 4 所示。图 6 所示 xoz 平面中砂轮圆上的采集点将呈现出“橄榄球”分布形状, 导致拟合得到的圆半径与实际半径相差较大。假设标准球的球心在坐标原点, 在赤道圆及砂轮圆上对应角度取点作平方差, 可得到赤道圆与砂轮圆对应角度的半径误

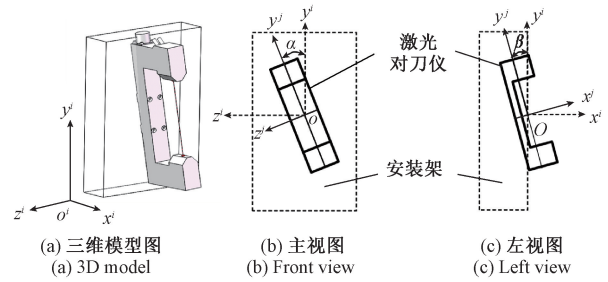
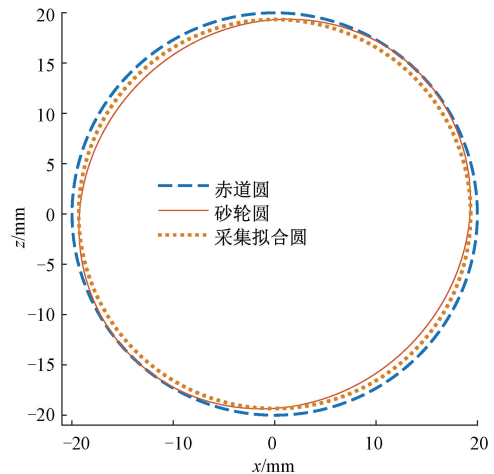


图 5 激光对刀仪安装误差

Fig. 5 Installation error of the laser tool setter

差曲线。图 7 为不同组 α, β 所做误差曲线图, 显然曲线的幅值会随 α, β 角度变大而变大, 存在确切的映射关系。超精密加工精度通常为 μm 级别, 因此测量精度应控制在 $1 \mu\text{m}$ 左右。假设砂轮半径为 12.5 mm , 那么当 α, β 均为 0.8° 即 0.014 弧度时, 理论计算得赤道圆与砂轮圆半径误差为 $1.2 \mu\text{m}$ 左右。由于机床缺少 Y 轴, 调节激光对刀仪的垂直度十分困难, 因此, 如何计算激光对刀仪夹角误差 α 与 β 的大小并对误差进行补偿是成本最低且最有效的方法。

图 6 投影到 xoz 平面曲线及采集拟合曲线Fig. 6 Projected to xoz plane curves and acquired to the fitted curve

2.2 误差计算

如图 8 所示, 机床坐标系 $x^i - y^i - z^i$ 先经过平移变换到中间坐标系 $x^j - y^j - z^j$, 再旋转变换到激光对刀仪坐标系 $x^k - y^k - z^k$ 。 $\mathbf{X}_{k\text{-tran}}^i, \mathbf{X}_k^i$ 表示在机床坐标系及激光对刀仪坐标系下的第 k 个采集点坐标, $\mathbf{X}_k^i$ 为机床坐标系下由在位测量系统采集到的坐标点, 等同于 $\mathbf{X}_{k\text{-tran}}^i$ 投影到 $x^j - o^j - z^j$ 平面。显然 $\mathbf{X}_k^i, \mathbf{X}_{k\text{-tran}}^i, \mathbf{X}_k^i$ 之间存在映射关系, 下文将进行推导。

由 2.1 节可知激光对刀仪的安装误差可分解为夹角误差 α 和 β , 以旋转矩阵 $\text{Rot}(x, \alpha), \text{Rot}(z, \beta)$ 来表示。

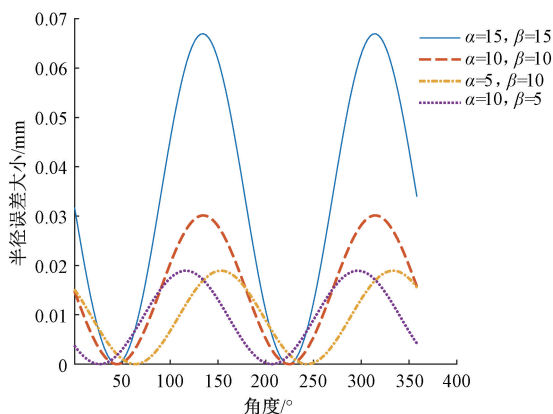
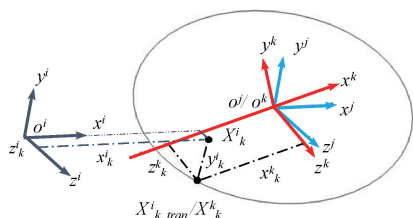
图7 不同 α 与 β 角度下半径误差曲线Fig. 7 Radius error curves under different α and β angles

图8 坐标变换示意图

Fig. 8 Diagram of the coordinate transformation

机床坐标系变换到中间坐标系的平移矩阵与球心坐标相关,表示为 $\text{Tran}(x_c, z_c)$, 因此可得机床坐标系到激光对刀仪坐标系的坐标变换矩阵:

$$T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c) = \text{Tran}(x_c, z_c) \text{Rot}(x, \alpha) \text{Rot}(z, \beta) \quad (1)$$

式中: x_c, z_c 为机床坐标系下球心 x, z 坐标。

在激光对刀仪坐标系中第 k 个采集点 X_k^i 可通过转换矩阵 $T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c)$ 变换为机床坐标系 $X_{k-\text{tran}}^i$, 过程如下:

$$X_{k-\text{tran}}^i = T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c) X_k^i \quad (2)$$

式中: $X_{k-\text{tran}}^i = [x_k^i \ y_k^i \ z_k^i \ 1]^T$, $X_k^i = [x_k^i \ y_k^i \ z_k^i \ 1]^T$ 。

假设球半径为 R , 球心坐标为 (x_c, z_c) , 由反正弦可求得采集到的点 X_k 角度 θ_k , 则激光对刀仪坐标系对应点 X_k^i 为 $(R \cos(\theta_k) + x_c, 0, R \sin(\theta_k) + z_c)$ 。结合式(2)计算 $X_{k-\text{tran}}^i$ 坐标, 其 x, z 坐标值理论上应与实际采集到的 X_k 相同, 因此可得 α 和 β :

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin \frac{z_k - z_c}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \arctan \frac{b}{a} \\ \beta = \arccos \frac{x_k - x_c}{R \sin(\theta_k) + x_c} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a = \sin(\beta)(x_c + R \cos(\theta_k))$; $b = z_c + R \sin(\theta_k)$; x_k, z_k 为第 k 采集点 x, z 数据。

2.3 误差补偿

为了减少计算误差, 采用非线性最小二乘拟合^[21]的方式计算最优 α 与 β 的数值大小, 此时的最优 α 与 β 即可视为激光对刀仪的安装误差角。误差公式如下:

$$r(\alpha, \beta) = \text{sum}(r_k(\alpha, \beta)) = \text{sum} \{ [\cos(\beta)(R \cos(\theta_k) + x_c) - x_k]^2 + [\cos(\alpha)(R \sin(\theta_k) + z_c) + \sin(\alpha) \sin(\beta)(R \cos(\theta_k) + x_c) + z_c - z_k]^2 \} \quad (4)$$

式中: $r(\alpha, \beta)$ 表示总误差值; $r_k(\alpha, \beta)$ 表示第 k 点的误差值; R 为球半径; x_c, z_c 为球心 x, z 坐标; x_k, z_k 为第 k 采集点 x, z 数据; θ_k 为第 k 点采样时角度。

X_k^i 为激光对刀仪坐标系下理想采样点, 其坐标值由起始点、结束点、角度间隔和球半径所共同决定, 前3项已知, 球半径可由原始数据近似拟合得到。将最优 α, β 代回转换矩阵 $T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c)$, 则实际采样点 X_k 的 y_k 坐标可由 $T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c) X_k^i$ 第2行结果取得, X_k 遗失的 y 坐标信息得以补全。之后根据坐标变换原理, 可将 X_k 变换回激光对刀仪坐标系, 即:

$$X_{k'}^i = \text{inv}(T_{ik}(\alpha, \beta, x_c, z_c)) X_k \quad (5)$$

式中: $X_{k'}^i$ 表示机床坐标系第 k 个逆转换点坐标。

最终取 $X_{k'}^i$ 的 x, z 坐标, 最小二乘拟合得到球半径。

标定及数据补偿具体步骤如下:

- 1) 由第1节中采集步骤进行数据采集。
- 2) 设置 α 与 β 的初始值。
- 3) 由 α 与 β 的初始值计算传递矩阵。
- 4) 由式(4)计算误差值大小, 若不满足要求, 则变换 α 与 β 大小, 重复步骤3)和4)。
- 5) 若满足需求, 则导出当前 α 与 β 作为标定的激光对刀仪安装误差角度值, 标定完成。
- 6) 利用标定值重新计算传递矩阵, 通过坐标逆变换将采集点 X_k 变换回激光对刀仪坐标系, 取变换后的 y 坐标, 补偿给 X_k 。
- 7) 拟合补偿后的 X_k , 得球半径。

3 实验部分

3.1 实验平台介绍

实验平台实物图如图9所示, 包括基于液体静压导轨自主设计的超精密磨床, 相关参数如表1所示。以及BLUM公司生产的测量精度在 $1 \mu\text{m}$ 以内的激光对刀仪和雷尼绍公司的球度小于 50 nm 的标准球。实验平台放置于恒温恒湿车间内, 温度稳定在 20°C , 无强光、强振动源等干扰因素, 整体试验环境稳定。

3.2 实验过程

机床采集时运动轨迹如图10所示。内外轨迹圆为同心圆, 半径分别小于、大于砂轮投影圆半径。采集

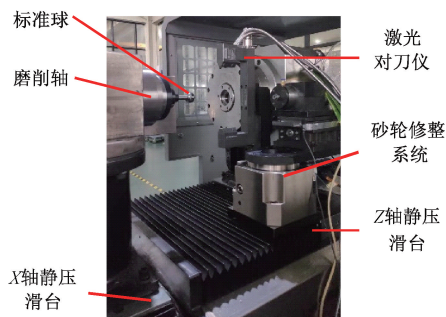


图 9 试验平台实物图

Fig. 9 Physical image of the test platform

表 1 X、Z 轴液体静压导轨参数
Table 1 Parameters of X and Z hydrostatic guideways

项目	X 轴导轨	Z 轴导轨
行程/mm	350	350
水平直线度	0.60 $\mu\text{m}/350\text{ mm}$	0.60 $\mu\text{m}/350\text{ mm}$
竖直直线度	0.60 $\mu\text{m}/350\text{ mm}$	0.60 $\mu\text{m}/350\text{ mm}$
X/Z 垂直度/arcsec	≤ 1	
定位/重复定位/ μm	≤ 1	

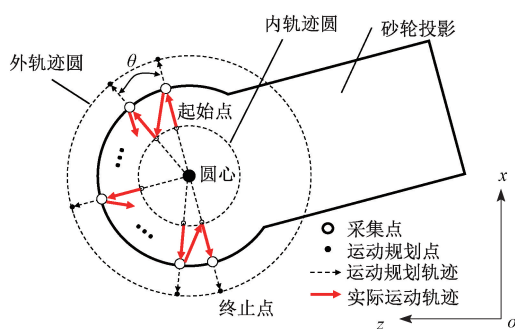


图 10 机床采集时运动轨迹

Fig. 10 Motion trajectory during acquisition

开始后,机床从内轨迹圆上设定的起始点出发,朝外轨迹圆上对应规划点运动。当运动到砂轮边缘上时,激光从遮断状态转变为导通,数控系统捕捉当前机床坐标。随后机床运动到内轨迹圆的下一个运动规划点,重复上述过程直至设置的终止点,采集到固定角度差 θ 的一系列坐标点。

为使采样点均匀分布,确定球心坐标是首要工作,其步骤如下:通过手脉将激光对刀仪大致移动到标准球球心处,取当前坐标位置为标准球球心位置。之后执行上述采集流程即可拟合得新的球心坐标,更新球心坐标后重复上述步骤至球心坐标无明显变化,则坐标确定,之后便可进行多次测量以获取相应数据。

为了验证本文所提出的砂轮在位测量方法的有效性,本实验先以 12.5 mm 标准球进行标定,之后以标定好的 α 、 β 数值进行补偿,对球度为 50 nm、半径分别为 3 mm 和 12.5 mm 的标准球进行在位测量。

3.3 实验结果分析

1) 标定 α 、 β 数值

以 10 mm/min 的运动速度对球半径 12.5 mm、球度 50 nm 的标准球进行数据采集,共采集 41 个数据点。首先对数据进行运算以得到球心坐标 x_c 、 z_c ,由此计算平移矩阵。之后在已知标准球半径的前提下对数据进行最小二乘拟合,计算出最佳角度偏差 $\alpha = -0.026$ 弧度, $\beta = 0.00051$ 弧度。为了验证该角度偏差计算值是否正确,将上述计算结果代入式(5)进行数据补偿,获得的理想采样点在机床坐标系空间位置如图 11 所示。由图可见,补偿 y 坐标后的测量数据点从二维回归到三维,弥补了前文所述的激光对刀仪因安装误差导致的测量偏差,在理论值为 12.5 mm 的情况下将测量结果从 12.497 0 mm 提高到了 12.499 9 mm,初步验证了标定结果及 2.2、2.3 节理论推导的正确性。

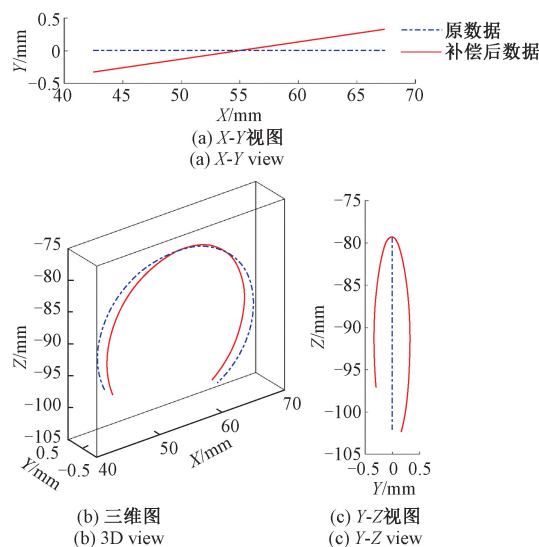


图 11 标定数据补偿结果

Fig. 11 Compensation results of calibration data

2) 标定后在位测量

理论上安装后的激光对刀仪角度误差不变,因此标定出 α 、 β 后,即可利用数据进行后续在位测量及补偿。沿用上一节中数据,认为其辨识出来的角度偏差 $\alpha = -0.026$ 弧度, $\beta = 0.00051$ 弧度为激光对刀仪安装时角度偏差,之后对 12.5 mm 球半径的标准球进行多组在位重复测量,获取其补偿前后的测量数据作比较,结果如图 12 所示。

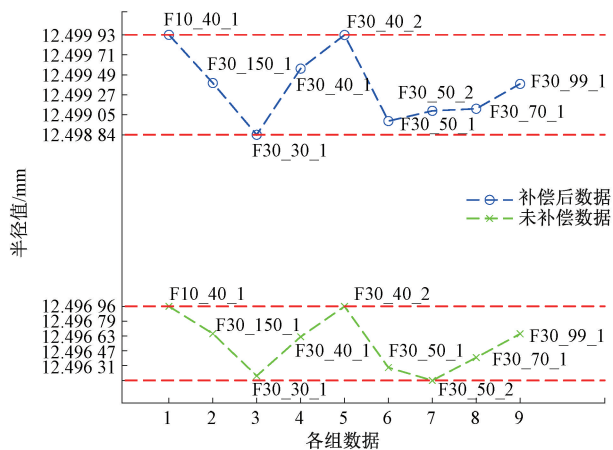


图12 标定后12.5 mm标准球测量结果

Fig. 12 Measurement results of 12.5 mm standard ball after calibration

图12为补偿前后的球半径值图,未补偿时半径误差普遍为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右,补偿后半径偏差值均降低到 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内,显著提高了测量精度。从结果可知,本文提出的在位测量方法在激光对刀仪安装误差客观存在的基础上,无需对激光对刀仪的安装进行调整或增添其它传感器,即可在现有条件下依靠标定与补偿算法有效降低测量误差,使测量精度满足超精密加工所需。

装上 3 mm 标准球后,继续以上述标定数据补偿 3 mm 标准球测量数据,其结果如图13所示,补偿前后半径从 2.9975 mm 变到 2.9990 mm ,测量误差从 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $1\text{ }\mu\text{m}$,进一步验证了本文提出的方法的有效性。

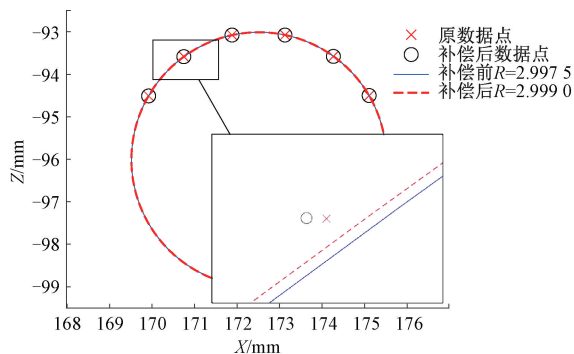


图13 标定后3 mm标准球测量结果

Fig. 13 Measurement results of 3 mm standard ball after calibration

4 结 论

针对球型砂轮直径误差造成磨削轨迹偏差,以及激光对刀仪安装误差导致测量偏差的问题,提出了一

种结合安装误差补偿的砂轮在位测量方案。该方案首先以三轴超精密磨床为基础设计并搭建了基于激光对刀仪的在位测量系统,然后抽象出激光对刀仪安装误差模型,分析其对测量精度的影响,同时结合齐次坐标变换推导出相应误差公式,最后借助非线性最小二乘法反求出激光对刀仪安装误差,并提出了误差补偿方法,实现对测量结果的误差补偿以及球型砂轮球半径数值的精确测量。实验表明结合了补偿公式的砂轮在位测量系统可将测量精度从 $4\text{ }\mu\text{m}$ 提高到 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,满足超精密加工需求。

参考文献

- [1] BRINKSMEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, et al. Ultra-precision grinding [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2):652-671.
- [2] WANG T, CHENG J, LIU H, et al. Ultra-precision grinding machine design and application in grinding the thin-walled complex component with small ball-end diamond wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5):2097-2110.
- [3] 陈杉杉. 平行法磨削加工表面微波纹形成的理论建模与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
CHEN SH SH. Theoretical modelling and experimental investigation of surface micro-waviness generation in parallel grinding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] 张宇. 球面磨削技术的研究与探讨[J]. 机床与液压, 2015, 43(22):44-46,76.
ZHANG Y. Study and investigation of spherical grinding technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(22):44-46,76.
- [5] SUN X, STEPHENSON D J, OHNISHI O, et al. An investigation into parallel and cross grinding of BK7 glass[J]. Precision Engineering, 2006, 30(2):145-153.
- [6] 周旭光,阎秋生,孔令叶. 轴对称非球面磨削加工中砂轮均匀磨损研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2017, 37(2):36-40.
ZHOU X G, YAN Q SH, KONG L Y. Uniform wear of the wheel in grinding axisymmetric aspheric[J]. Diamond &

- Abrasives Engineering, 2017,37(2):36-40.
- [7] 陈冰,胡红禄,钟一星,等.非球面垂直磨削法的砂轮误差分析与实验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2017,37(5):24-29,40.
- CHEN B, HU H L, ZHONG Y X, et al. Analysis and experimental research of grinding wheel errors in cross grinding aspheric surface [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017,37(5):24-29,40.
- [8] 李立军,张飞虎,董申.非球面平行法磨削技术研究[J].机械工程师,2007(1):31-32.
- LI L J, ZHANG F H, DONG SH. Research on parallel grinding technique of aspheric optics [J]. Mechanical Engineer, 2007(1):31-32.
- [9] 陈冰,郭兵,赵清亮,等.树脂基圆弧金刚石砂轮的在位精密成形修整技术[J].机械工程学报,2016,52(11):193-200.
- CHEN B, GUO B, ZHAO Q L, et al. On-machine precision form truing of resin bonded arc-shaped diamond wheels [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11):193-200.
- [10] 母德强,刘夏,张广丽,等.基于差压式测头的砂轮磨损量及钝化程度研究[J].流体传动与控制,2015(6):31-34.
- MU D Q, LIU X, ZHANG G L, et al. Study on wear and passivation degree of wheel based on differential pressure probe [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2015(6):31-34.
- [11] 崔长彩,余卿,张遨,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 AO, et al. Measurement system of surface topography for diamond grinding wheel [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12):3167-3174.
- [12] ZHOU L, WEI Q, CHEN X, et al. In-situ detection and evaluation of wear state of micro-powder diamond wheel in optics grinding [C]. Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications VI. 2019, 11189:1118904.
- [13] LI T, QIU Z, TANG J. Research on measurement method of grinding wheel profile based on image mosaic [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 31(3):035402.
- [14] XU L M, FAN F, ZHANG Z, et al. Fast on-machine profile characterization for grinding wheels and error compensation of wheel dressing [J]. Precision Engineering, 2019, 55: 417-425.
- [15] 吴培鹏,蔡文郁,唐国栋,等.激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(7):170-177.
- WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Laser range measuring system based on dynamic multi-threshold error correction method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7):170-177.
- [16] 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.
- [17] 陈锋,陈五一,陈志同.基于激光三角法的CBN杯形砂轮表面形貌检测[J].北京航空航天大学学报,2011,37(10):1321-1325.
- CHEN F, CHEN W Y, CHEN ZH T. Laser triangulation based measurement about the surface 3D topography of a cup CBN grinding wheel [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10):1321-1325.
- [18] 王成武,陆惠宗,吴俊杰,等.激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J].仪器仪表学报,2021,42(5):1-8.
- WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5):1-8.
- [19] 张桥杰,朱祥龙,董志刚,等.基于激光位移传感器在机测量砂轮直径[J].组合机床与自动化加工技术,2020(2):84-88,92.
- ZHANG Q J, ZHU X L, DONG ZH G, et al. On-line measurement of grinding wheel diameter based on laser

displacement sensor [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(2): 84- 88, 92.

- [20] 杨勇明,汪中厚,刘欣荣,等. 磨齿机在机检测机构几何误差链建模与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 9- 19.

YANG Y M, WANG ZH H, LIU X R, et al. Modeling and compensation of geometric error chain of on-machine inspection mechanism for gear grinder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 9- 19.

- [21] 莫小琴. 基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J]. 无线互联科技, 2019, 16(4): 128- 129.

MO X Q. Linear and nonlinear fitting based on least square method[J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(4): 128- 129.

作者简介



陶宇轩, 2019 年于重庆大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为系统集成与控制。

E-mail: taoyux1997@163.com

Tao Yuxuan received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2019. He is currently pursuing his master degree at Huazhong University of Science and Technology. His current research interests include system integration and control.



刘秀峰(通信作者), 2011 年于三峡大学获得学士学位, 2015 年于武汉科技大学获得硕士学位, 现为华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向是伺服电机控制技术、数控技术和超精密机床。

E-mail: liuxiufeng15@hust.edu.cn

Liu Xiufeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China Three Gorges University in 2011, and received his M. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 2015. He is currently pursuing his Ph. D. degree with the School of Mechanical Science and Engineering at Huazhong University of Science and Technology. His current research interests include motor servo control, CNC technology, and ultra-precision machine tools.



曹海印, 2011 年于华中科技大学获得学士学位, 现为华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向是液体静压、动静压轴承和超精密机床。

E-mail: hust-chy@foxmail.com

Cao Haiyin received his B. Sc. degree from the Huazhong University of Science and Technology in 2011. He is currently pursuing his Ph. D. degree with the School of Mechanical Science and Engineering at Huazhong University of Science and Technology. His research interests include hydrostatic/hybrid bearings and ultraprecision machine tools.