

文章编号 1004-924X(2014)12-3167-08

金刚石砂轮表面形貌测量系统

崔长彩*, 余 卿, 张 遨, 李瑞旭, 黄 辉, 王 爽
(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了实现对金刚石砂轮表面形貌的非接触精密测量, 开发了基于干涉原理的金刚石砂轮表面形貌专用测量系统, 研究了该系统的测量原理和关键技术。根据垂直扫描白光干涉显微测量原理以及被测对象的特征, 提出了适用于砂轮测量的方法, 研究了系统的自动扫描范围、垂直方向的扫描方法、单次测量三维表面的恢复算法和磨粒的识别算法。结合自行设计的夹具搭建了砂轮测量系统, 并对多次测量拼接算法进行了实验分析。实验结果表明: 基于区域重合大小(重合度为 30%~50%)的拼接算法获得的拼接前后重合区域的相关系数均大于 0.8, 拼接后重合区域的高度差均小于 0.4 μm 。得到的结果显示所搭建的系统可以恢复砂轮的形貌, 其测量范围和精度满足砂轮磨粒评定和分析的要求。

关键词: 金刚石砂轮; 表面形貌测量; 白光干涉仪; 曲面拼接

中图分类号: TH744.3; TH161.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3167

Measurement system of surface topography for diamond grinding wheel

CUI Chang-cai*, YU Qing, ZHANG Ao, LI Rui-xu, HUANG Hui, WANG Shuang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: cuichc@hqu.edu.cn

Abstract: In order to precisely measure the surface topography of a diamond grinding wheel in a non-contact way, an interferometry based special topographic measurement system was established and the principle and key techniques of the system were investigated. On the basis of the principle of vertical scanning white light interferometry and the characteristics of measured objects, an approach suitable for grinding wheel measurement was presented. Then, the key techniques such as automatic scanning range determination, larger vertical scanning, three dimensional surface reconstruction and abrasive grain recognition, were analyzed. With a specific setup for wheel fixing, a wheel measurement system was given based on the proposed method and its stitching method for a larger area evaluation was analyzed experimentally. Experimental results indicate that the correlation coefficient of the regions before and after stitchings is more than 0.8 by using area-based method with an overlapping area of 30%—50%. The height error of the stitched area is less than 0.4 μm . The system recovers the three dimensional surface of the grinding wheel and obtained measuring ranges and accuracy meet the requirements for analysis and evaluation of grinding wheels.

Key words: diamond grinding wheel; surface topography; white light interferometer; surface stitching

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-03-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075160); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-10-0116); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. PCSIRT1063)

1 引言

精密制造技术是高新产业的基础技术之一。作为典型的精密制造技术,磨削为现代高新产业的实现奠定了技术基础。精密磨削过程中,作为去除材料的“刀具”——砂轮的自身精度是确保磨削质量的重要条件之一。金刚石砂轮是一种超硬材料砂轮,在硬脆性材料的加工中有着重要应用。为实现高精度加工,需要对砂轮尺寸、形状和磨粒的分布形貌进行有效刻画,但由于砂轮形貌复杂,其测量和评价是亟待解决的问题。砂轮的测量和评价方法主要有接触式和非接触式两种。英国 Liam 教授采用轮廓仪^[1],谢晋教授的课题组尝试用精密坐标测量仪测量了砂轮形貌^[2]。但触针式仪器存在触针磨损问题,不利于砂轮表面形貌的测量;另外测量机探头的尺寸还限制了砂轮磨粒细节的提取。常用的非接触式方法采用电镜或显微镜定性观察和分析砂轮的表面形貌。日本学者较早地开展了数字化测量技术,Tamaki 教授提出了用非接触光学轮廓仪记录砂轮的表面形貌及磨粒分布^[3]。大连理工大学、清华大学等采用白光干涉仪实现了砂轮形貌的检测^[4-5]。南京航空航天大学则较早采用计算机视觉技术分析了砂轮的形貌^[6]。华侨大学采用聚焦合成技术恢复了砂轮的三维形貌^[7]。CAI 等则尝试用激光三角法测量了砂轮形貌^[8]。上述文献多用商业仪器对被测砂轮进行测量采样,有些实例无法发挥仪器自身的长处,还有些仪器不能满足砂轮形貌测量和评价的要求。

金刚石砂轮表面形貌不同于一般工件的表面微观形貌,它由磨粒和结合剂及其形成的间隙构成,表面的粗糙度和磨粒的硬度较大,因此不适合采用接触式测量方法。针对现代精密磨削技术对砂轮形貌全面数字化刻画的需要,本文基于垂直扫描白光干涉显微测量原理,开发了金刚石砂轮表面形貌的精密测量系统。

2 测量方法和原理

砂轮形貌的复杂性是制约砂轮表面形貌测量及后续评价的瓶颈。金刚石砂轮的磨粒极其坚硬,而且表面的复杂孔隙极易嵌入接触式探针,因

此无法使用一般接触式测量仪。白光干涉仪是非接触式光学轮廓仪,利用干涉原理可实现表面信号的提取,由于光源采用白光,其干涉长度较小,利于定位被测点的相对高度,从而实现复杂表面的三维测量。由于砂轮表面存在磨粒和结合剂两种材料,其干涉光强曲线存在明显差异,本文在采用传统方法实现三维高度测量的同时,利用此特点提取了磨粒。砂轮的结合剂有多种,如树脂结合剂、青铜结合剂等。

砂轮的三维测量系统原理如图 1 所示^[9]。系统主要由干涉显微镜、白光光源、CCD 及驱动机构等组成。干涉显微镜采用抗干扰能力较强的 Mirau 型显微镜,驱动机构包括用于对焦的步进电机和用于垂直扫描采样的压电陶瓷驱动器(PZT)。测量时,首先用 CCD 采集被测物体在干涉显微镜中形成的干涉图像,利用计算机对采集的图像进行数字图像处理,并结合控制策略控制驱动机构,实现对焦功能和扫描范围的确定。然后根据白光干涉恢复算法应用 PZT 实现垂直扫描采样,进而恢复三维表面特征。

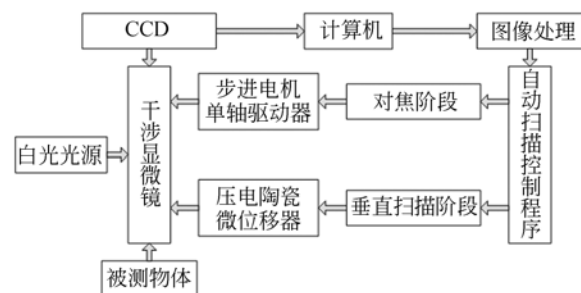


图 1 金刚石砂轮表面形貌测量系统的原理图

Fig. 1 Block diagram of measurement system of surface topography for diamond grinding wheel

白光干涉垂直扫描三维表面恢复算法主要依据白光相干长度短的特性恢复被测对象的高度信息。在垂直扫描过程中,被测表面的每一点都会得到一系列采样点,其光强会形成由弱到强再到弱的变化,其包罗线为正态分布曲线,如图 2 所示^[10]。其中横坐标表示产生干涉图样的两路相干光的光程差,纵坐标表示干涉光强值。当两路光的光程差为零时干涉最强,能够产生干涉的光程差很小,仅为几个微米。因此,每条包络曲线的峰值点对应于测量光束与参考光束光程差为零的时刻,如图 2 横坐标为 0 的位置。一般通过记录此时扫描驱动器的步进数或者扫描机构垂直方向

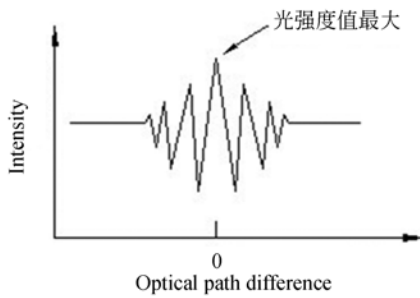
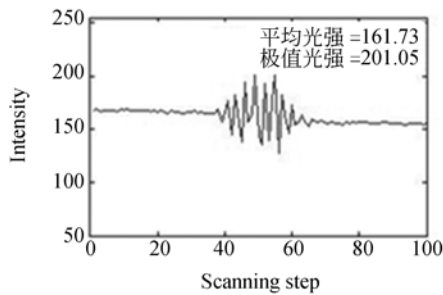


图 2 被测表面上某点的光强变化

图 2 Variation of intensities on a measured point

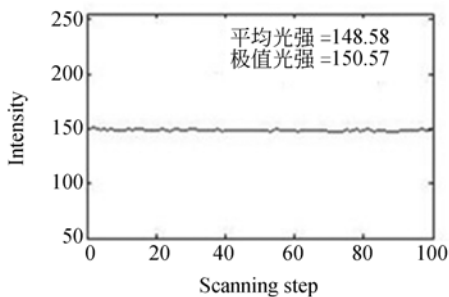
实际的位移值来计算被测表面各点的高度,并已经演化出多种计算算法,如白光相位算法、质心算法、改进质心算法等。

在传统的垂直扫描白光干涉术三维表面测量和恢复方法中,一般工件的每个被测点的干涉峰值曲线具有相似的包络,即干涉曲线的宽度和高度相似,其信息一般由背景光强和测量光强及噪声等组成。而在金刚石砂轮表面的测量中,由于被测表面主要含有金刚石和结合剂两种材质,且



(a) 来自金刚石磨粒的光强曲线

(a) Intensity curve from diamond grain



(b) 来自结合剂的光强曲线

(b) Intensity curve from bond

图 3 不同材料的被测点形成的干涉曲线

Fig. 3 Curves of intensity from different materials

金刚石磨粒具有较强的反光特性,而结合剂相对较暗。因此由金刚石磨粒部分形成的干涉曲线的高度值较大,明显不同于其他部分,如图 3 所示。3(a)是磨粒表面测量点形成的光强随扫描步进的变化曲线,3(b)是结合剂上测量点形成的光强随扫描步进的变化曲线,据此能很容易地识别出磨粒。

3 测量系统的关键算法

3.1 自动扫描范围的确定

由于垂直测量范围取决于扫描机构的垂直位移距离,而精密移位机构,如 PZT 的移位范围较小,一般仅为几十微米,因此为了充分利用扫描机构实现较大起伏表面的测量,有必要在扫描采样前确定扫描的起始位置及估计终止位置。自动扫描范围的确定不同于一般的自动对焦^[11],对焦是确定清晰成像的位置,而扫描范围的确定则是要确定系统开始进入干涉区域到淡出干涉区域的区间。首先在步进电机驱动下采集一系列图像 $I(z_i), i=1, 2, \dots, L, L$ 为垂直扫描采样步进数。然后计算相邻两帧图像的灰度变化:

$$\Delta I(z_i) = I(z_{i+1}) - I(z_i). \quad (1)$$

将 $\Delta I(z_i) (i=1, 2, \dots, L-1)$ 视为图像的灰度,计算 $\Delta I(z_i)$ 中灰度不为零的像素数量 H ,对每一幅图像中所有灰度不为零的像素计算灰度平均值 $\Delta I(z_i)_{ave}$ 和灰度最大值 $\Delta I(z_i)_{max}$:

$$\Delta I(z_i)_{ave} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \Delta I(x, y, z) / H, \quad (2)$$

$$\Delta I(z_i)_{max} = \max_{0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1} (\Delta I(x, y, z_i)), \quad (3)$$

其中: M, N 为图像尺寸, $\Delta I(x, y, z_i)$ 表示高度 z_i 处的灰度变化图像在 $(x, y) (0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1)$ 点的强度,定义 T 为扫描范围提取的阈值:

$$T = \sum_{i=1}^{L-1} K(z_i) / L - 1, \quad (4)$$

其中:

$$K(z_i) = \Delta I(z_i)_{ave} + \Delta I(z_i)_{max}. \quad (5)$$

以 T 为阈值对 $\Delta I(z_i)_{max}$ 曲线进行水平切割,切割后所得到的区域就是所扫描区域。如图 4 所示,对纵坐标做归一化处理,得到自动扫描区间为阈值所截取的 $\Delta I(z_i)_{max}$ 曲线对应的扫描位置。

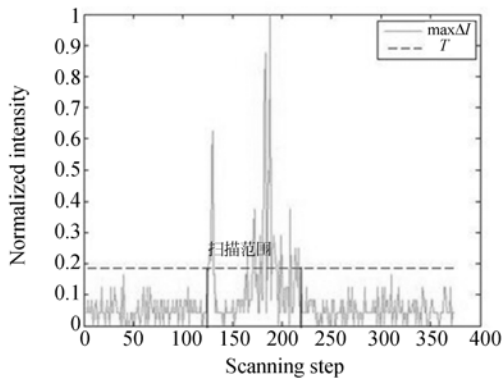


图 4 计算得出的扫描区域

Fig. 4 Scanning range by calculation

3.2 垂直方向大范围测量的实现

由于垂直扫描移位驱动的精度要求较高,而一般移位范围较小,仅几十微米,为进一步增大垂直扫描测量范围以适于大磨粒砂轮表面的测量,本文结合用于自动扫描范围确定的电机和光栅计数,采用接力技术扩大了单个 PZT 的扫描范围。在扫描起点确定后,PZT 驱动系统单次扫描到最大范围,由光栅记录每步的具体位移值。电机驱动 PZT 整个部件到某一距离,由光栅记录具体位移值,PZT 恢复电压归零且重新开始扫描至其最大范围。如此反复,即可达到某一需要的较大扫描范围,整个过程中由光栅记录实际位移值。其中每次电机推动精密扫描机构前进的某一距离要小于机构自身的扫描距离,以便于垂直数据的有效合成,从而满足三维重构的需要。

3.3 单次测量三维恢复算法

如前所述,被测点测量曲线的峰值点可定位被测表面的高度,如图 5 所示。如果垂直扫描移位精度足够大,则可以直接将最大值采样点用于提取表面三维数据;但这势必增加硬件成本,因此目前多通过配合相应的恢复算法来补偿移位精度不高的精度损失。

本文采用简单易于实现的改进质心算法计算峰值点^[12],被测表面 (x, y) 点的高度信息为:

$$h(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} m(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^{n-1} m(z_i)}, \quad (6)$$

其中:

$$m(z_i) = [I(z_{i+1}) - I(z_i)]^2, \quad (7)$$

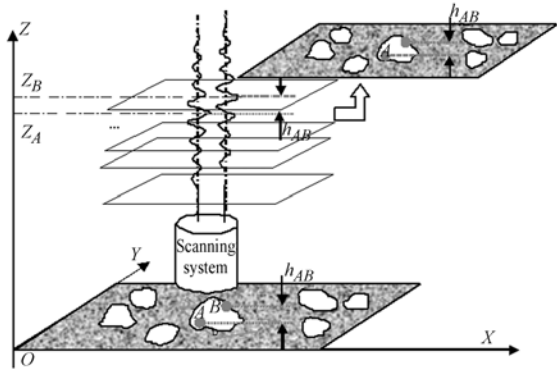


图 5 被测表面高度恢复原理

Fig. 5 Surface reconstruction principle of measured object

其中: $I(z_i)$ 为扫描高度 z_i 处的光强。改进质心算法是从干涉光强中减去直流信号,并且通过平方运算适当地增加干涉相干项,以减小直流信号的影响,用相邻扫描位置光强变化的平方值 $m(z_i)$ 代替光强值 $I(z_i)$,如式(7)所示。

3.4 金刚石磨粒的提取算法

如前所述,由于磨粒与结合剂具有明显的反光差异,故可直接设定阈值,将磨粒从原始测量数据中提取出来,以便于磨粒的出刃高度、分布密度和间距等的计算。为了提高分离精度,本文采用了基于 Canny 算子的方法。Canny 算子是一种一阶微分算子,其基本原理是利用二维图像中灰度的突变进行边缘检测。由于砂轮表面磨粒边缘的高度具有突变的特征,故利用此算法可提取磨粒,其中目标和背景分离的阈值采用最大类间方差法计算^[13]。

4 多次测量拼接实验与分析

4.1 测量流程与多次测量拼接方法

为了实现大面积的表面测量,可配合二维精密驱动机台及拼接算法,将多次测量结果缝合成为整体表面,以便于全面地分析和评价表面特征。本文采用了基于重合区域的拼接方法,具体测量和拼接流程如图 6 所示^[14]。

与传统的图像拼接不同,本文不是处理二维图像数据的灰度值,而是经过三维恢复得到表面的高度数据,并且采用 9×9 的窗口进行均值滤波的噪声预处理。

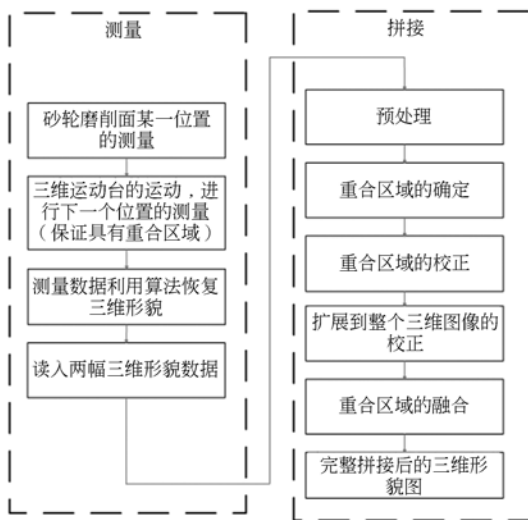


图 6 两幅子图之间拼接的流程图

Fig. 6 Flowchart of measuring and stitching

4.2 测量系统构建

基于垂直扫描白光干涉原理的金刚石砂轮测量系统如图 7 所示。其中为了实现砂轮的精确定位,设计了专用夹具。此夹具通过伺服电机驱动,可以根据测量需求实现大面积测量。

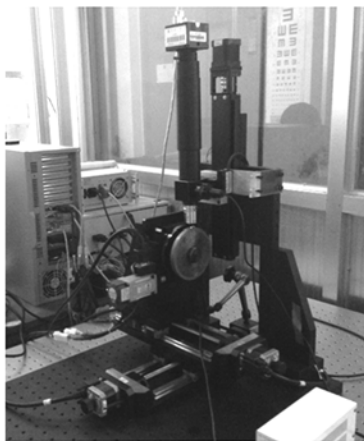


图 7 金刚石砂轮测量系统

Fig. 7 Measurement system of diamond grinding wheel

4.3 拼接重合区域实验

由于单次测量面积很小,因此拼接算法十分重要。文中应用 3 个参数分析了重合区域的选取,3 个参数分别是校正后重合区域的相关系数 ϵ ,校正前后两个重合区域的高度差绝对值的平均值 $\Delta\bar{I}$ 和 $\Delta\bar{I}'$ 。

在砂轮的磨削面选取相邻两个不同面积重合

区域(用重合百分数表示)的曲面,按照文中方法拼接。拼接后面积为 A (用像素表示),结果如表 1 所示。

表 1 不同大小重合区域的两表面拼接结果

Tab. 1 Results of stitching with different percents of overlapping areas

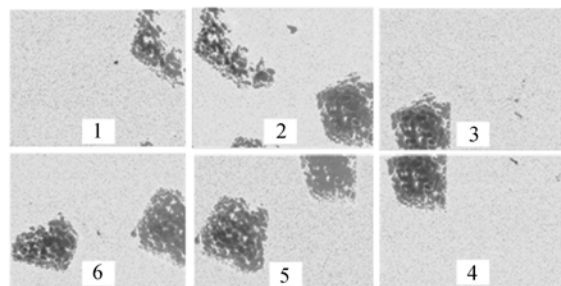
重合区域大小 (pixel×pixel)	$A/$	ϵ	$\Delta\bar{I}/\mu\text{m}$	$\Delta\bar{I}'/\mu\text{m}$
26%	620×1 388	0.844	0.364	0.360
35%	622×1 324	0.861	0.322	0.311
45%	623×1 239	0.868	0.315	0.229
55%	600×1 158	0.814	0.313	0.309

由表 1 可见,随着重合区域的增大,拼接面积减小。重合区域过小,拼接算法中的模板就不能取过大,匹配容易失败,而重合区域过大则会造成一定的浪费。许多文献中都提及重合区域,但是都没有一个明确的评定方法来判断其值,只能给出一个范围,因此本文选取的重合区域设在 30%~50%。

4.4 拼接算法验证

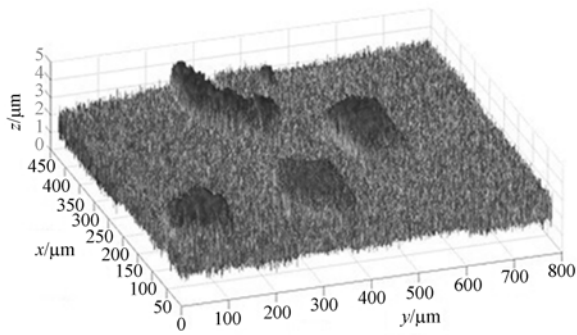
对金刚石砂轮进行了实验测量,粒度为 120#,直径为 100 mm,内径为 31.75 mm。显微镜为 20 倍 Mirau 型干涉显微镜,多次测量后经三维重构和拼接恢复的砂轮形貌如图 8 所示。其中图 8(a)为待拼接的 6 幅子图,8(b)为拼接后的三维图。

图 8(a)中,待拼接的子图大小均为 600 pixel × 800 pixel,拼接后的图像大小为 943 pixel × 1 728 pixel,实际尺寸约为 424 μm × 777 μm ,评价参数见表 2。



(a) 待拼接的 6 幅子图

(a) Six images for stitching



(b) 6 幅子图拼接的形貌

(b) Surface after stitching six images

图 8 120# 砂轮表面形貌

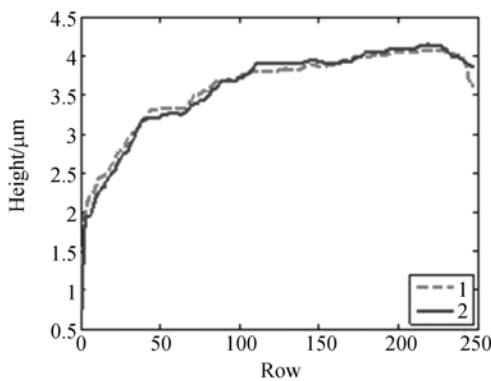
Fig. 8 Results of 120# grinding wheel

表 2 图 8(a)中各子图之间的拼接评定参数

Tab. 2 Stitching results of images in Fig. 8(a)

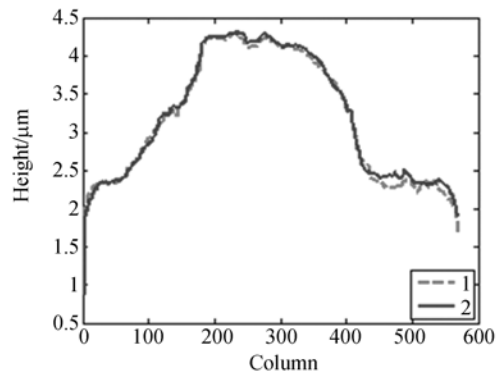
评价参数	ϵ	$\Delta \bar{I} / \mu\text{m}$	$\Delta \bar{I}' / \mu\text{m}$
子图 1 与 2	0.876	0.296	0.294
子图 2 与 3	0.817	0.384	0.351
子图 4 与 5	0.880	0.425	0.400
子图 5 与 6	0.828	0.868	0.339
子图 1,2,3 与子图 4,5,6	0.875	0.890	0.350

其中,子图 1、子图 2 拼接校正后重合区域的行列截面图如图 9 所示。图 9(a)是某行重合部分的截线,图 9(b)是某列重合部分的截线,图中 1,2 分别为校正后的左、右两幅图像重合区域的截面。由图可见重合情况较理想。



(a) 某行截面图

(a) Cross-section of a row



(b) 某列截面图

(b) Cross-section of a column

图 9 子图 1 和 2 拼接重合区域的行列截面图

Fig. 9 Cross-sections of stitched surface of images 1 and 2

4.5 实验结果分析

由实验结果可以看出,对于粒度为 120# 的金刚石砂轮,当拼接图像幅数较少时,得到的拼接图像内的磨粒数量较少,如图 8 所示,可满足磨粒局部分析之需。当需要大面积评价时需要更多次测量,得到多幅子图,配合适合的算法进行拼接。由于粒度 120# 磨粒的尺寸约在 $106 \sim 125 \mu\text{m}$,其高度一般在几十微米。根据表 2 参数可知,各个相邻子图(如 1 和 2,2 和 3 等)拼接后的重合区域的高度差均不到 $0.4 \mu\text{m}$,重合度很好,见图 9;而且合成后子图(如 1、2、3 合成后,4、5、6 合成后)再拼接得到的重合区域高度差也不到 $0.4 \mu\text{m}$,拼接精度可满足砂轮磨粒的评价需要。

5 结 论

本文根据精密磨削技术对砂轮表面形貌量化表征的需求,提出了基于干涉原理的非接触自动测量方法,对其基本原理、关键技术和系统构建进行了分析,并结合多次测量拼接对系统性能进行了实验研究。由实验结果可知,系统得到了较好的拼接效果:校正后重合区域的相关系数均大于 0.8,校正后的重合区域的高度差的绝对值均值都减少了,拼接和调整后的重合区域在误差范围内。

对于粒度较小的砂轮,需要进行多次测量得到较多幅子图进行拼接,才能得到包含较多磨粒的拼接图像。目前由于拼接算法的局限性,本方法仅

适用于砂轮局部磨粒或者细粒度磨粒砂轮的表面分析,对于多颗磨粒更大拼接面积的统计分析则需要采用更高效的拼接算法。

参考文献:

- [1] BLUNT L,EBDON S. The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*,1996,36(11):1207-1226.
- [2] XIE J,XU J,TANG Y, *et al.*. 3D graphical evaluation of micron-scale protrusion topography of diamond grinding wheel[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*,2008,48(11):1254-1260.
- [3] TAMAKI J,KITAGAWA T. Evaluation of surface topography of metalbonded diamond wheel utilizing three dimensional profilometry[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*,1995,35(10):2339-2351.
- [4] 霍凤伟,郭东明,金洙吉,等. 细粒度金刚石砂轮形貌测量与评价[J]. *机械工程学报*,2007,43(10):108-113.
HUO F W, GUO D M, JIN ZH J, *et al.*. Measurement and evaluation of the surface topography of fine diamond grinding wheel[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 108-113. (in Chinese)
- [5] YAN L, RONG Y M, JING F, *et al.*. Three-dimension surface characterization of grinding wheel using white light interferometer[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(1-4):133-141. (in Chinese)
- [6] 张小锋. 关于砂轮地貌双目视觉检测技术的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
ZHANG X F. *Fundamental Research on the Detection Technology of Grinding Wheel Topography Based on Binocular Vision Principle*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [7] 龚俊锋,徐西鹏. 基于聚焦合成的砂轮表面三维重构方法[J]. *金刚石与磨料磨具工程*,2006(4):14-16.
- GONG J F, XU X P. 3-D surface reconstruction of grinding wheel topography based on depth from focus [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2006(4):14-16. (in Chinese)
- [8] CAI R, ROWE W B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*,2004,44(12-13):1391-1402.
- [9] 吴志顺,崔长彩,叶瑞芳,等. 基于阈值判定法的白光干涉仪自动扫描技术研究[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(12): 1482-1489.
WU ZH SH, CUI CH C, YE R F, *et al.*. Research on white-light interferometer automatic scanning technology based on threshold[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(12): 1482-1489. (in Chinese)
- [10] White_light_interferometry[Z/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/White_light_interferometry.
- [11] 周丽平,孙志俊,张泉. 显微视觉系统的自动对焦[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 807-812.
ZHOU L P, SUN ZH J, ZHANG Q. Auto-focusing and control of vision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 807-812. (in Chinese)
- [12] AI C, NOVAK E L. Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry[P/OL]. <http://www.google.com.hk/patents/US5633715?hl=zh-CN&dq=7,958,388&ei=UIsAUNvAF-io0AHR15zJBw1997,US5633715A>.
- [13] 米曾真,谢志江,陈涛,等. 重轨图像增强与边缘提取的关键技术[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1645-1652.
MI Z ZH, XIE ZH J, CHEN T, *et al.*. Key technology of image enhancement and edge extraction

for heavy rail[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1645-1652. (in Chinese)

[14] WANG SH, CUI CH C, HUANG CH Q, et al..

Stitching for a large area of surface topography analysis of diamond grinding wheel [J]. *SPIE*, 2012, 8759:87591B.

作者简介:



崔长彩(1972—),女,山东胶南人,教授,博士生导师,1996年于佳木斯大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2005~2009年于华中科技大学机械工程博士后流动站从事博士后研究,2011-2012年英国 Huddersfield 大学精密技术中心访问学者,主要研究方向为表面形貌评定技术、表面形貌测量技术及自动测量仪器的研究。E-mail: cuichc@hqu.edu.cn



余 卿(1983—),男,江西新余人,博士,讲师,2005年,2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电检测、精密机械设计方面的研究。E-mail: jorson.y@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)