

文章编号 1004-924X(2016)增-0020-08

砂轮偏心信号的高精度检测方法

王振忠*, 陈世平, 王泉金, 俞 辉

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了提高精密加工中金刚石砂轮安装的偏心信号测量精度, 首先采用非接触式测量法建立了一种基于激光位移传感器单点测量砂轮偏心信号的模型, 然后提出一种基于砂轮回转轮廓圆度误差最小化的砂轮偏心量高精度逼近算法。该算法通过坐标转换、归一化处理、权值修正能快速还原出砂轮的偏心距和偏心方向。最后根据信号采集过程中传感器与磨床主轴的相互位置关系, 得到了理想砂轮偏心信号的解析式, 并进行了砂轮偏心检测的仿真实验。结果表明, 本方法可以实现对砂轮偏心量的高精度检测, 其检测相对误差总体保持在 6% 以内且收敛速度快。分析实际测量数据发现, 采用本算法还原出砂轮偏心距和偏心角的最大测量误差分别保持在 0.005 mm 和 0.02 rad 以内, 能够满足精密磨削加工中砂轮偏心量的检测精度要求。

关键词: 非接触测量; 偏心检测; 归一化; 快速逼近; 砂轮安装

中图分类号: TG580.21+3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0020

High accuracy detection algorithm for eccentric signal of grinding wheel

WANG Zhen-zhong*, CHEN Shi-ping, WANG Quan-jin, YU Hui

(School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: wangzhenzhong@xmu.edu.cn

Abstract: To improve the measurement precision of eccentricity signal during installation of diamond grinding wheel under high-precision machining, a kind of model based on single-point measurement of grinding wheel eccentricity signal by laser displacement sensor was set up based on the non-contact measurement. Then a high-precision approach algorithm for grinding wheel eccentricity put forward based on minimization of the rotary contour roundness error. The algorithm can fast restore eccentric distance and direction of the grinding wheel through coordinate transformation, normalization processing and weight correction. Finally, based on position relationship between the sensor and principal axis of the grinder during signal acquisition, an analytic formula for ideal grinding wheel eccentricity signal is given, and a simulation experiment for eccentricity detection of grinding wheel was also carried out. The simulation results indicate that this method can achieve high-precision detection of grinding wheel eccentricity, with high convergence rate and a relative detection error within 6%. The analysis on the experimental measurement data shows that stabilization precision of measurement repeatability by using the algorithm to restore eccentricity and eccentric angle of the grinding wheel remains within

收稿日期: 2016-05-17; 修订日期: 2016-06-08.

基金项目: 福建省高端装备制造协同创新中心资助项目

0.005 mm and 0.02 rad respectively, which meets the detection precision requirement for grinding wheel eccentricity during its high-precision grinding operation.

Key words: non-contact measurement; eccentricity detection; normalization; fast approach; grinding wheel installation

1 引言

磨削是精密加工与超精密加工的重要手段。作为加工工具的金刚石砂轮,实际加工过程中无法完全避免修整及安装偏心带来的误差,由于磨削加工的工具复写特性,偏心误差的控制程度直接影响加工精度、砂轮的使用寿命和加工成本等^[1]。因此,有必要对砂轮偏心高精度检测手段进行研究。

在砂轮静平衡的基础上,精密磨削中砂轮偏心调整主要分为安装时的手动调整及锁紧后的动平衡控制。目前,国内外的学者对砂轮安装偏心的自动调整研究较少,主要侧重于由质量偏心引起的动平衡控制问题。高精度磨削加工机床通常外装、内置或接触、非接触式等自动实时平衡,可控制砂轮振动在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下^[2]。Su J 等人提出一种采用非接触驱动的机械式平衡头^[3],工作时通过内置微型电机驱动,该装置的调节精度在 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$,但是结构较复杂。西安交通大学樊红卫等人设计一种电磁式自动平衡头^[4]并进行振动响应测试,测试结果表明该平衡头自锁可靠、实时性好。北京大学 Pan X 等人提出一种使用压缩空气转移液体的磨床动平衡系统^[5]。与传统的液体喷射装置相比,液体转运装置有一个更快的平衡速度和更高的线性平衡能力,从而改善了平衡系统的控制速度和控制精度。近年来,有些学者提出砂轮电主轴动平衡技术^[6],即用电主轴取代原来的砂轮主轴,实验表明该平衡技术的响应更快、精度更高。

为保证锁紧后的砂轮动平衡控制精度,安装时的手动调整精度必须要达到微米级别,因此手动精度调整反复费时且具有随机性^[7]。本文从砂轮安装偏心的高精度自动调整研究出发,开发了砂轮偏心信号的高精度检测算法,从而为后续砂轮安装偏心自动调整提供理论基础。首先建立一种基于激光位移传感器单点测量的偏心信号快速测量模型,然后采用一种基于砂轮回转轮廓圆

度误差最小化的砂轮偏心量高精度逼近算法,通过坐标转换、归一化处理、权值修正等方法^[8]快速还原出砂轮的偏心距和偏心方向。最后通过计算机仿真和实测砂轮偏心信号的实验分析,验证了所提出检测算法的可行性与可靠性。

2 砂轮偏心检测基本原理

砂轮旋转运动的轮廓信号通常包括砂轮偏心信号、砂轮振动信号、砂轮表面圆度误差信号、主轴回转误差信号及外界干扰信号^[9]。其中,外界干扰信号可通过滤除原始信号中的高阶分量分离出来。当砂轮在主轴的带动下高速旋转时,砂轮动不平衡产生的振动信号很大程度影响着砂轮偏心信号的测量。为了避免砂轮振动信号对偏心信号测量结果的干扰和提高信号的检测精度,测量过程中应保证砂轮在低速下旋转。

如图 1 所示, O 为主轴轴心位置,以 O 为原点建立直角坐标系 XOY , O' 点为砂轮圆心的初始位置, O 与 O' 点的距离 R 为砂轮的偏心距,偏心角为 α ,砂轮的半径为 r 。

将激光位移传感器测头固定在 Y 轴上的 A_0

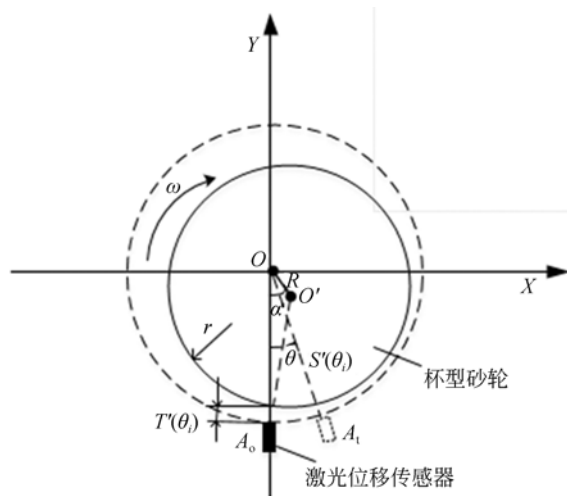


图 1 砂轮安装偏心检测基本原理

Fig. 1 Principle for installation eccentricity measurement

点处,砂轮在磨床主轴的带动下以角速度 ω 做顺时针回转运动,假设 $T(\theta)$ 为理想情况下激光位移传感器采集到的砂轮回转轮廓数据, $T(\theta)$ 明显具有周期性。考虑到砂轮表面的圆度误差 $R(\theta)$ 、主轴回转误差 $H(\theta)$ 和测量时机床工频干扰 $E(\theta)$ 的影响,激光位移传感器测头实际采集到的数据 $T'(\theta)$ 可表示为:

$$T'(\theta) = T(\theta) + R(\theta) + H(\theta) + E(\theta). \quad (1)$$

设激光位移传感器的采样频率为 f ,由采样定理, f 应满足 $f > \omega/\pi$ 。经过时间 t 后,砂轮相对磨床主轴转过的角度为 $\theta(\theta = \omega t)$ 。为便于分析砂轮在主轴上的位置,假定砂轮静止不动,传感器沿角速度 ω 的逆向转过 θ 角到达 A_i 点位置,则第 i 点 ($i = ft$) 的信号 $T(\theta_i)$ 可表示为:

$$T'(\theta_i) = T(\theta_i) + R(\theta_i) + H(\theta_i) + E(\theta_i). \quad (2)$$

在采集完 m 圈数据后,采集到的数据点数 n 可表示为:

$$n = \frac{2\pi mf}{\omega}. \quad (3)$$

所测量数据点的平均值为:

$$\overline{T'(\theta_i)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T'(\theta_i). \quad (4)$$

为了便于还原砂轮的回转轮廓,可将测量数据点 $T'(\theta_i)$ 转化为间接采样序列 $S'(\theta_i)$ 。首先将测量数据 $T'(\theta)$ 的中心线位置移动到 X 轴,得到:

$$T''(\theta_i) = T'(\theta_i) - \overline{T'(\theta_i)}, \quad (5)$$

则根据几何关系, $S'(\theta_i)$ 可以表示为:

$$S'(\theta_i) = r - T''(\theta_i). \quad (6)$$

这样可由测量数据信号 $T'(\theta)$ 实现对 $S'(\theta_i)$ 的间接测量。

3 砂轮偏心量的高精度算法

由砂轮偏心测量的基本原理可知,通过采集实测激光位移传感器接收到的信号 $T'(\theta_i)$ 可以得到间接的采样信号序列 $S'(\theta_i)$ 。为了精确求出砂轮的偏心距和偏心角,首先以 $S'(\theta_i)$ 采样信号序列为极径,按照一定的角度间隔 (ω/f) 在极坐标上还原出砂轮的回转轮廓;然后采用一种基于砂轮回转轮廓圆度误差最小化的砂轮偏心量高精度逼近算法,通过坐标转换、归一化处理、权值

修正等方法快速还原出砂轮的偏心距和偏心方向。

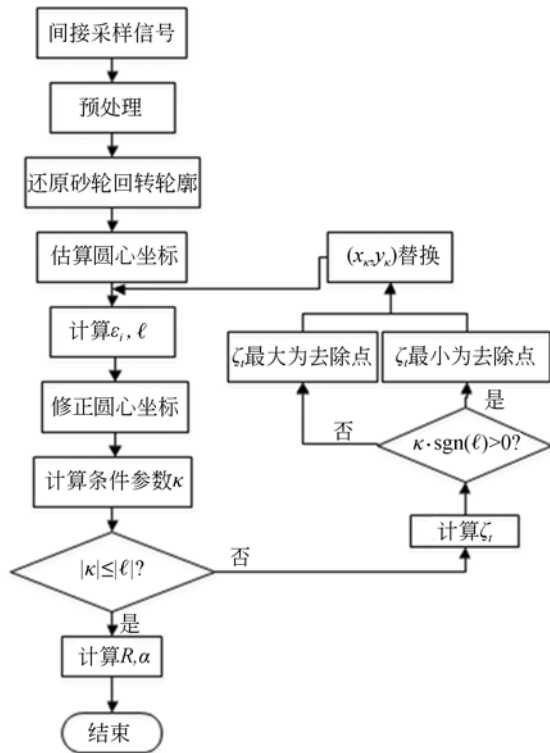


图 2 砂轮偏心量高精度逼近算法流程图

Fig. 2 Flow chart of high precision approximation algorithm for calculation of eccentricity of grinding wheel

算法流程如图 2 所示,具体步骤如下:

(1)数据的预处理。采用快速傅里叶变换或者小波变换对 $S'(\theta_i)$ 进行简单的降噪处理,消除信号中的噪声干扰。假设间接采样序列 $S'(\theta_i)$ 共有 n 个数据点,由砂轮转速 ω 和采样频率 f 可知砂轮每转动一圈采集到的数据点为 $L = 2\pi f/\omega$,计算 n/L 的整数部分 m ,截取实验数据的前 mL 个点 $S'_m(\theta_i)$ 作为分析对象。再将所得 m 圈测量数据点 $S'_m(\theta_i)$ 通过求取均值转化成一圈数据 $S'_1(\theta_i)$,则 $S'_1(\theta_i)$ 可表示为:

$$S'_1(\theta_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S'_m(\theta_{i+(j-1)L}), i = 1, 2, 3 \cdots mL. \quad (7)$$

(2)还原砂轮回转轮廓。由砂轮偏心测量的基本原理可知,以 $S'_1(\theta_i)$ 信号序列为极径,假设第一点的极坐标为 $\left[S'_1(\theta_1), -\frac{\pi}{2} \right]$,按照一定

的角度间隔 (ω/f) 沿砂轮旋转角速度方向的逆向将 $S'_1(\theta_i)$ 数据点依次描绘在极坐标上,可以还原出砂轮的回转轮廓,此时极坐标的坐标原点是磨床主轴轴心的所在位置。重构砂轮回转轮廓信号虽然已经过降噪处理,但仍含有具有周期性的主轴回转误差信号和砂轮圆度误差信号,不过采用本文算法不必对这两种干扰信号进行分离,可直接利用这些点的坐标来逼近砂轮的圆心坐标,最后得到砂轮的偏心距和偏心方向。

(3) 初步估算砂轮的圆心坐标。先通过简单的极坐标与直角坐标转化将分析数据点转化到直角坐标系,得到计算所用数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_L, y_L)$, 初步估算砂轮的圆心坐标 (x_0, y_0) 为:

$$x_0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i, y_0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i. \quad (8)$$

(4) 建立局部坐标,并进行归一化处理。以 (x_0, y_0) 点为坐标原点建立局部直角坐标,这时数据点 (x_i, y_i) 在局部坐标中的坐标 (x'_i, y'_i) 为:

$$x'_i = x_i - x_0, y'_i = y_i - y_0. \quad (9)$$

则各点到局部坐标原点的距离 r'_i 可表示为:

$$r'_i = \sqrt{x'^2_i + y'^2_i}. \quad (10)$$

对将各点坐标进行归一化处理则有:

$$x''_i = x'_i / r'_i, y''_i = y'_i / r'_i. \quad (11)$$

(5) 构造圆心坐标的修正参数。选取回转轮廓上的 4 个点 $(i_1, j_1), (i_2, j_2), (i_3, j_3), (i_4, j_4)$, (其中, i_i, j_i 分别对应归一化处理后的 x''_i, y''_i) 应尽可能保证所取的点均布在轮廓圆上,假设这 4 个点到 (x_0, y_0) 的距离分别为 l_1, l_2, l_3, l_4 , 所构造的修正参数如下:

$$\varepsilon_1 = \begin{vmatrix} 1 & i_2 & j_2 \\ 1 & i_3 & j_3 \\ 1 & i_4 & j_4 \end{vmatrix}, \varepsilon_2 = \begin{vmatrix} 1 & i_1 & j_1 \\ 1 & i_3 & j_3 \\ 1 & i_4 & j_4 \end{vmatrix}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_3 = \begin{vmatrix} 1 & i_1 & j_1 \\ 1 & i_2 & j_2 \\ 1 & i_4 & j_4 \end{vmatrix}, \varepsilon_4 = \begin{vmatrix} 1 & i_1 & j_1 \\ 1 & i_2 & j_2 \\ 1 & i_3 & j_3 \end{vmatrix}.$$

进一步构造修正参数 ℓ :

$$\ell = -\frac{\varepsilon_1 l_1 + \varepsilon_2 l_2 + \varepsilon_3 l_3 + \varepsilon_4 l_4}{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| + |\varepsilon_3| + |\varepsilon_4|}. \quad (13)$$

(6) 修正 $l_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。根据修正参数修正 l_i :

$$l'_i = l_i + \ell \cdot \text{sgn}(\varepsilon_i), (i = 1, 2, 3, 4). \quad (14)$$

(7) 修正砂轮的圆心坐标。通过求取超静定方程式(15)的最小二乘解算出修正后砂轮的圆心坐标 (x'_0, y'_0) 及砂轮逼近半径 r'_0 , 即有:

$$\begin{cases} l'_1 = r'_0 + x'_0 i_1 + y'_0 j_1 \\ l'_2 = r'_0 + x'_0 i_2 + y'_0 j_2 \\ l'_3 = r'_0 + x'_0 i_3 + y'_0 j_3 \\ l'_4 = r'_0 + x'_0 i_4 + y'_0 j_4 \end{cases}. \quad (15)$$

(8) 构造判别条件,判断所求砂轮圆心坐标 (x'_0, y'_0) 是否为最佳逼近,如果不满足判别条件,则需更换其中的某个点重复步骤(5)、(6)、(7)。首先求取判别参数:

$$\kappa = \max(|r'_i - (r'_0 + x'_0 x''_i + y'_0 y''_i)|), \quad (i = 1, 2, \dots, L). \quad (16)$$

然后引入判别条件:如果 $\kappa \leq \lambda \cdot |\ell|$, 则认为此时所求砂轮圆心坐标 (x'_0, y'_0) 为最佳逼近;如果 $\kappa > \lambda \cdot |\ell|$, 则判断该次砂轮圆心坐标失效,需要更换所选取 4 点中的某点坐标按照步骤(5)、(6)、(7)重新计算砂轮的圆心坐标。其中, λ 为松弛因子,取值一般为 5~20,在保证该程序段不会进入无限循环状态的情况下, λ 的取值越小,逼近结果的精度越高。坐标替换步骤如下:

1) 假设 κ 所对应的点的坐标为 (x_κ, y_κ) , 即满足 $\kappa = r_\kappa - (r'_0 + x'_0 x_\kappa + y'_0 y_\kappa)$, 通过方程组(17)求解参数 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$:

$$\begin{cases} \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + 1 = 0 \\ \eta_1 i_1 + \eta_2 i_2 + \eta_3 i_3 + \eta_4 i_4 + x_\kappa = 0 \\ \eta_1 j_1 + \eta_2 j_2 + \eta_3 j_3 + \eta_4 j_4 + y_\kappa = 0 \\ \eta_i = 1 \end{cases}. \quad (17)$$

然后通过式(18)求参数 ζ_i :

$$\zeta_i = \frac{\eta_i}{\varepsilon_i}, (i = 1, 2, 3, 4). \quad (18)$$

2) 判断 $\kappa \cdot \text{sgn}(\ell)$ 的正负号,若 $\kappa \cdot \text{sgn}(\ell) > 0$, 则确定 4 点中使得参数 ζ_i 最小的点为替换点;若 $\kappa \cdot \text{sgn}(\ell) < 0$, 则确定 4 点中使得参数 ζ_i 最大的点为替换点。

3)用 (x_k, y_k) 按照步骤 2)的方法替换 4 个点中的某一点,然后重新计算砂轮的圆心坐标,直至满足步骤(8)中的终止条件。

(9)计算砂轮的偏心距和偏心角。根据上述步骤,假设经过 k 次逼近后满足终止条件得到修正后砂轮的圆心坐标为 (x'_k, y'_k) ,因为该坐标是局部坐标,可通过简单的转化最终确定砂轮在 XOY 坐标中的圆心 (x_{00}, y_{00}) :

$$x_{00} = x'_k + x_0, y_{00} = y'_k + y_0. \quad (19)$$

偏心距 R 可表示为:

$$R = \sqrt{x_{00}^2 + y_{00}^2}. \quad (20)$$

为了确定砂轮的偏心方向,引入偏心角的概念。假设激光位移传感器采集到的砂轮轮廓数据中第一个点为 A 点,连接回转轴心 O,以 OA 方向为正向建立极坐标,称该坐标为测量坐标;偏心角定义为圆心坐标在该测量坐标中的极角。根据测量坐标与绝对直角坐标之间的关系,得到偏心角 $\alpha(0 < \alpha < 2\pi)$ 的计算表达式如下:

$$\alpha = \begin{cases} \arctan(\frac{y_0}{x_0}) + \frac{\pi}{2}, & x_{00} > 0 \\ \arctan(\frac{y_0}{x_0}) + \frac{3\pi}{2}, & x_{00} < 0 \end{cases}. \quad (21)$$

4 仿真实验

由测量原理可知,实测砂轮偏心数据 $T'(\theta)$ 通过转化可得到便于计算的 $S'(\theta)$ 信号,因此可直接构造仿真信号 $S'(\theta)$ 来检验本算法的精度。在理想状态下, $S(\theta_i)$ 可由几何关系得到。当 $t \neq n \cdot \pi / \omega (n = 0, 1, 2 \dots)$ 时,联立方程组(22)求得图 1 中 A_i 的位置坐标 (x_i, y_i) 。

$$\begin{cases} (x_i - R \sin \theta)^2 + (y_i + R \cos \theta)^2 = r^2 \\ y_i = -x_i \cot \theta \end{cases}. \quad (22)$$

由于该方程组有两组解,假设所求得的横坐标 x 分别为 $x_1, x_2 (x_1 > 0, x_2 < 0)$,当 $t = 0$ 时,由余弦定理容易求得:

$$S_0 = R \cos \alpha + \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R + r^2}. \quad (23)$$

通过计算, $S(\theta_i)$ 可表示为:

$$S(\theta_i) = \begin{cases} \frac{x_1}{|\sin(\theta_i)|}, & 2\pi n < \theta_i < (2n+1)\pi \\ \frac{-x_2}{|\sin(\theta_i)|}, & (2n+1)\pi < \theta_i < 2(n+1)\pi \\ R \cos \alpha + \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R + r^2}, & \theta_i = 2n \cdot \pi \\ -R \cos \alpha + \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R + r^2}, & \theta_i = (2n+1) \cdot \pi. \end{cases} \quad (24)$$

其中 $n=0, 1, 2, \dots$ 。仿真实验参数设置如下:砂轮半径 $r=45$ mm、偏心距 $R=2$ mm、偏心角 $\alpha=\pi/6$ 、角速度 $\omega=0.5 \pi \text{ rad/s}$ 、采样频率 $f=256$ 、采样点数 $n=3\ 300$,由此可确定理想仿真信号 $S(\theta_i)$ 。因为实测砂轮偏心信号受砂轮表面圆度误差信号、主轴回转误差信号及磨床工频等因素的干扰,可在 $S(\theta)$ 信号中加入一定的白噪声构造仿真信号 $S''(\theta)$ 。图 3 为加噪后的 $S''(\theta)$ 信号,图 4 为预处理阶段采用小波变换法降噪得到的信号。

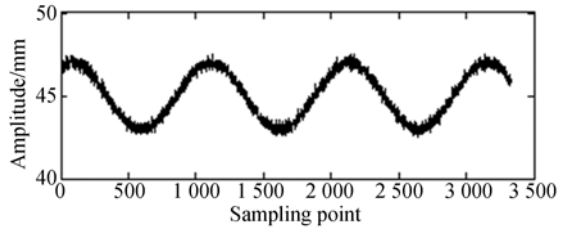


图 3 模拟砂轮偏心信号

Fig. 3 Eccentric analog signals of grinding wheel

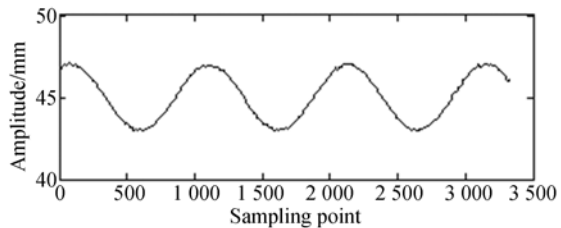


图 4 降噪后的砂轮偏心信号

Fig. 4 Eccentric signals of grinding wheel after signal denoise

为了验证本文所提算法处理砂轮偏心信号的有效性,分别对理想信号加入不同幅值的噪声信号,观察当原始偏心信号受到不同程度干扰时该算法的精度,重构结果如表 1 所示。实验结果表明,当噪声信号幅值小于 0.6 mm 时(约占原信号幅值的 30%),该算法的相对误差能够保持在 6% 以内。

表 1 砂轮偏心参数的重构结果

Tab. 1 Reconstruction results of eccentricity parameters

序号	噪声幅值	重构偏心距 R			重构偏心角 α		
		R 值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	α 值/rad	绝对误差/rad	相对误差/%
1	0.1	2.0097	0.0097	0.49	0.5131	0.0105	2.01
2	0.2	2.0051	0.0051	0.26	0.5248	0.0012	0.23
3	0.3	1.9341	0.0659	3.30	0.5364	0.0128	2.45
4	0.4	1.9451	0.0549	2.74	0.5062	0.0174	3.33
5	0.5	1.9320	0.0680	3.40	0.5380	0.0144	2.75
6	0.6	1.9244	0.0756	3.78	0.5505	0.0269	5.41

5 实例分析

利用本文的测量方法对精密磨床上外径为 92 mm 的杯型砂轮的偏心信号进行了测量,测量结果传输到计算机上进行数据处理,图 5 为实验数据采集现场图,图 6 是重构的砂轮回转轮廓图。实验中砂轮的主轴转速为 300 r/min,采样频率为 1 000 Hz,采样时间为 5 s,采样点数为 5 000 点。偏心信号检测采用日本 KEYENCE 公司的 LKG10 激光位移传感器,其分辨率是 0.01 μm 。为了验证本文所提砂轮偏心量逼近算法的有效性,选定一组测量数据,在算法步骤(5)构造的圆心坐标修正参数中分别选取 5 组不同的数据点作为修正砂轮圆心坐标的初始点,实验结果如表 2 所示。对比各组实验结果不难发现,各组之间最后所求得的偏心距和偏心角的最大变化量分别为 0.002 7 mm 和 0.017 2 rad,说明该算法对初始点的选取不敏感;几组实验的最大逼近次数为 3,说明该算法的收敛速度快。

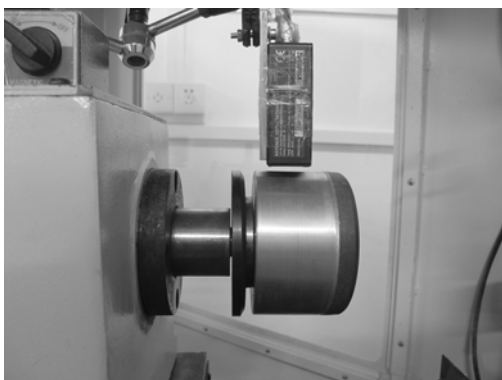


图 5 实验数据采集现场图

Fig. 5 Photo of field experiment

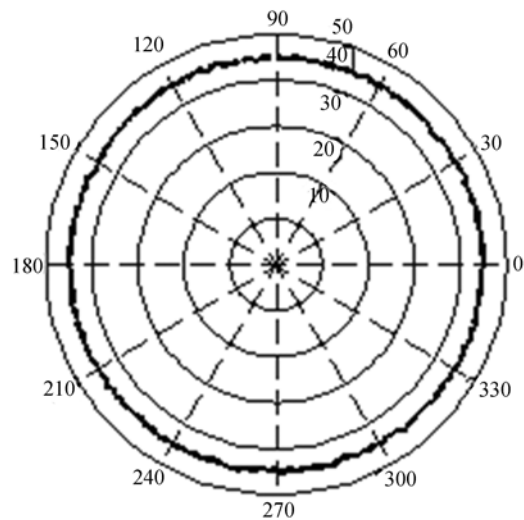


图 6 重构的砂轮回转轮廓

Fig. 6 Refactoring turning contour of grinding wheel

表 2 选取不同初始点逼近结果对比

Tab. 2 Results of eccentricity parameters fitted with different initial points

组别	逼近次数	计算参数	第一次	第二次	第三次
1	3	偏心距 R/mm	0.041 6	0.041 2	0.041 4
		偏心角 α /rad	5.241 9	5.261 9	5.264 1
2	2	偏心距 R/mm	0.041 9	0.042 2	—
		偏心角 α /rad	5.258 4	5.271 0	—
3	2	偏心距 R/mm	0.041 0	0.041 1	—
		偏心角 α /rad	5.272 0	5.278 4	—
4	2	偏心距 R/mm	0.039 8	0.039 8	—
		偏心角 α /rad	5.255 5	5.262 4	—
5	2	偏心距 R/mm	0.039 6	0.039 5	—
		偏心角 α /rad	5.255 4	5.261 2	—

为评价本算法的稳定性,将激光位移传感器

测头沿砂轮轴向等间距移动到不同的回转截面作为测量面,然后利用本系统对该测量面进行扫描测量,共测 6 组数据,对每一组实验数据再采用本文算法重构砂轮在磨床主轴上的偏心距和偏心方向,实验结果如表 3 所示。可以看出,在 6 组实验中,重构砂轮偏心距的变化量在 0.005 mm 以内,重构砂轮偏心角的变化量在 0.02 rad 以内,具有良好的检测重复性和较高的稳定精度。实验结果表明,本测量系统能够正确反映砂轮偏心量的参数,测量稳定性高。

表 3 不同测量位置逼近结果对比

Tab. 3 Results of eccentric parameters fitted with different measuring position

实验组	最后逼近值	
	偏心距 R/mm	偏心角/rad
1	0.041 8	5.264 5
2	0.041 1	5.275 1
3	0.043 3	5.268 9
4	0.039 8	5.263 3
5	0.043 6	5.257 6
6	0.039 2	5.266 8
最大偏差	0.004 4	0.017 5

参考文献:

- [1] ZHOU Q Y, ZHOU Z X, LI Y. Research on dynamic balance of grinding wheel spindle[J]. *Advances in Grinding and Abrasive Technology XVI*, 2011,487:482-485.
- [2] 郭隐彪,郑琳,王振忠. 高精度非球面加工双轴动平衡监控技术研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 434-438.
GUO Y B, ZHENG L, WANG ZH ZH. Study on single-plane biaxial balance monitor system in ultra-precision aspheric grinding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 434-438. (in Chinese)
- [3] SU J, GAO B. Design of non-contact balance head for grinding wheel[J]. *Advanced Manufacturing Systems*, 2011, 201-203:557-560.
- [4] 樊红卫,景敏卿,王仁超,等. 一种电磁式自动平衡头设计计算与响应试验[J]. *振动·测试与诊断*, 2014, 34(5):807-811.
FAN H W, JING M Q, WANG R CH, et al.. Design of electromagnetic automatic balancing head and response test[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(5): 807-811. (in Chinese)
- [5] PAN X, WU H Q, GAO J J, et al.. New liquid transfer active balancing system using compressed air for grinding machine [J]. *ASME. J. Vib. Acoust*, 2015, 137(1): 011014-011014-8.
- [6] 乔晓利,祝长生. 基于内置力执行器的砂轮不平衡振动主动控制[J]. *振动与冲击*, 2012, 24:125-130.
QIAO X L, ZHU CH SH. Grinding wheel unbalance vibration active control based on the internal force actuator[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 24:125-130. (in Chinese)
- [7] 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 Y, et al.. Measurement system of surface topography for diamond grinding wheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3167-3174. (in Chinese)
- [8] DHANISH. A simple algorithm for evaluation of minimum zone circularity error from coordinate data

6 结 论

本文利用单点测量法获取砂轮回转轮廓表面数据,通过还原各个时刻传感器测头与砂轮间的相互位置关系,重构砂轮在磨床主轴上的位置及形貌,实现砂轮偏心信号的精密测量。同时,提出一种快速识别磨床上砂轮偏心的高精度逼近算法,该算法的优点在于对外界噪声干扰不敏感,收敛速度快,测量精度高。仿真实验结果表明,该算法的检测相对误差总体保持在 6% 以内。采用该算法无需分离出实测信号中的主轴回转误差和圆度误差,因此该方法也是一种含主轴回转误差和圆度误差处理的综合算法。现场测量结果表明,对于同一组实验数据,当选取不同初始点时,重构砂轮偏心距和偏心角的最大变化量分别为 0.002 7 mm 和 0.017 2 rad;对于不同位置的测量数据,重构砂轮偏心距和偏心角的最大变化量分别在 0.005 mm 和 0.02 rad 以内。本算法的计算结果既不依赖于初始点的选取,也不依赖于测量数据点的位置。此外,对于其他类型的回转体偏心信号的检测该方法同样具有参考价值。

[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002,42:1589-1594.

[9] GUO W, CHEN R, JIN J. Online eccentricity mo-

onitoring of seamless tubes in cross-roll piercing mill

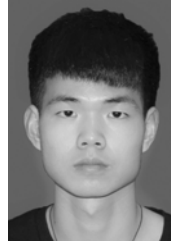
[J]. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, 2015, 137

(2):021007-021007-10.

导师简介:



王振忠(1970—),男,福建泉州人,博士,副教授,2009年于厦门大学获得博士学位,主要从事精密加工装备及工艺技术、微纳米加工与系统控制、超声复合加工技术方面的研究。Email:wang-zhenzhong@xmu.edu.cn



陈世平(1992—),男,福建泉州人,硕士研究生,2015年于海南大学获得学士学位,主要从事智能制造和精密加工方向的研究。E-mail:chensp_xmu@139.com