

# 考虑系统振动的电主轴回转误差检测方法研究\*

蒋冠<sup>1</sup>, 刘厚才<sup>1</sup>, 康辉民<sup>1</sup>, 胡灿<sup>1</sup>, 周岳<sup>1</sup>, 曹正<sup>1</sup>,  
欧阳智海<sup>1</sup>, 李旺<sup>1</sup>, 段良辉<sup>2</sup>, 曾海燕<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学机电工程学院 湘潭, 411201)

(2. 中国兵器江南工业集团有限公司数控加工分厂 湘潭, 411207)

(3. 长沙医学院信息工程学院 长沙, 410219)

**摘要** 针对目前机床主轴的回转精度检测不能反映主轴在切削工况下的实际回转精度、现有三点法检测的主轴回误差信号包含了系统振动信号的问题, 在传统三点法的基础上加入振动加速度传感器, 实时测量系统的振动加速度, 进而提出一种包含系统振动信号分离的新型三点法。首先, 通过建立考虑系统振动的回转误差检测数学模型, 得到系统的振动位移和传感器相对主轴的绝对位移; 其次, 采用误差分离技术, 得到主轴在切削工况下的实际回转误差; 最后, 研制出一套主轴在切削工况下的回转误差检测装置并进行了实验验证。研究结果表明, 所提出方法能有效提高主轴在切削工况下回转误差的检测精度。

**关键词** 机床主轴; 回转误差; 在线检测; 误差分离  
**中图分类号** TH161.5

## 引言

电主轴作为高端数控机床的核心部件, 其回转精度直接影响产品的加工精度。对电主轴回转误差进行精确测量可以有效评定数控机床的加工精度, 同时也是数控机床加工进行主动误差补偿的重要依据。目前, 回转精度的检测方法主要有打表法、单点法、两点正交法、反转法、多步法和多点法等。打表法<sup>[1]</sup>为接触式测量, 不适合对高速主轴进行检测。单点法<sup>[1]</sup>通过单个非接触式位移传感器测量误差敏感方向的误差运动, 可以实现对高速主轴回转误差的测量, 但其测量精度依赖于机床加工误差敏感方向, 不能对主轴的表面圆度误差进行有效分离。两点正交法<sup>[2]</sup>通过2个正交布置的非接触式位移传感器, 采集2个方向的误差运动信号, 可实现对任意加工误差敏感方向的回转误差检测, 但仍不能对主轴圆度误差进行有效分离。反转法<sup>[3]</sup>和多步法<sup>[4]</sup>通过数学运算可实现对回转误差与圆度误差的有效分离, 但测量过程复杂, 多用于离线状态下对空载主轴进行误差标定, 不适合对主轴进行在线检测。多点法使用2个以上非接触式传感器, 可有效分离出主

轴的圆度误差与回转误差<sup>[5]</sup>, 在测试过程中不需要对主轴进行停机处理, 适合对主轴进行在线检测。在常见的多点法中, 三点法<sup>[6]</sup>因具有安装难度小、数据处理难度适中、通过合理选择传感器安装角度可有效减少谐波抑制现象等优点, 故得到广泛运用。

三点法测量通过研究误差分离权函数来优化传感器安装角度的方法, 实现了对谐波抑制现象的有效抑制<sup>[7]</sup>, 通过加入去噪方法实现了对系统噪声的有效抑制<sup>[8]</sup>, 通过改进数据处理过程提高了其误差分离精度<sup>[9]</sup>, 实现了初步的回转误差在线测量<sup>[10]</sup>。目前, 三点法主轴回转误差测量主要以实验室条件下使用标准棒和标准球对空载条件下的主轴进行测量, 对主轴实际切削工作下的测量研究较少。机床主轴实际工作时不可避免地会产生振动<sup>[11]</sup>, 所测得的位移数据是受振动影响下的相对位移<sup>[12]</sup>, 难以反映主轴的真实回转误差。

为实现在切削工况下对主轴的回转误差进行有效检测, 笔者在传统三点法的基础上, 加入振动加速度传感器实时测量传感器夹具的振动加速度信号, 采用低频衰减频域积分法<sup>[13]</sup>对加速度信号进行二次积分, 计算得到传感器夹具的振动位移信号和主轴相对

\* 国家自然科学基金资助项目(51875198); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ7007); 湘潭市联合基金资助项目(2021JJ50118)

收稿日期: 2022-11-20; 修回日期: 2023-04-03

于位移传感器的绝对位移数据。使用三点法误差分离算法实现了对切削工况下主轴回转误差的精确检测,研制了一套切削工况下的主轴回转误差检测装置,对不同切削参数主轴的回转误差进行了检测。

## 1 建立数学模型

### 1.1 传统三点法检测数学模型

图1为传统三点法测量原理图。3个位移传感器以特定的角度 $\gamma, \alpha, \beta$ 安装在同一主轴径向截面上,3个传感器头部到主轴中心的距离相等。传感器测得的信号中包含主轴回转误差 $\delta(\theta)$ 、主轴圆度误差 $r(\theta)$ 和安装偏心误差 $e(\theta)$ 。3个位移传感器的输出信号表达式为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = e(\theta + \gamma) + r(\theta + \gamma) + \delta_x(\theta) \cos \gamma + \delta_y(\theta) \sin \gamma \\ S_2(\theta) = e(\theta + \alpha) + r(\theta + \alpha) + \delta_x(\theta) \cos \alpha + \delta_y(\theta) \sin \alpha \\ S_3(\theta) = e(\theta + \beta) + r(\theta + \beta) + \delta_x(\theta) \cos \beta + \delta_y(\theta) \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\theta$ 为主轴旋转角度; $\gamma, \alpha, \beta$ 为传感器相对水平方向的夹角。

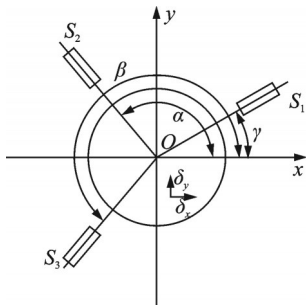


图1 传统三点法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of traditional three-point measurement

### 1.2 新型三点法检测数学模型

传统的三点法回转误差检测方法中,位移传感器相对测量坐标原点静止。在主轴空载的情况下机床振动很小,位移传感器可通过夹具安装在机床床身甚至地面,此时每个传感器相对测量坐标原点静止,式(1)成立。

与主轴空载运行相比,机床主轴在实际切削加工过程中考虑到机床各导轨的进给运动,传感器需通过夹具直接安装在主轴壳体上。受切削力的影响,切削工况下系统不可避免地会产生振动,此振动位移不可忽略<sup>[12]</sup>。受系统振动位移的影响,在实际测量时非接触式位移传感器的检测信号中会包含系

统的振动位移成分 $u_x$ 和 $u_y$ ,此时位移传感器相对测量坐标原点将不再静止,所测得的位移数据不是传感器与主轴间的绝对位移,故式(1)不再成立。

图2为笔者提出的新型三点法回转误差检测方法原理图。3个非接触式位移传感器通过整体式专用夹具固定在主轴壳体,实现对主轴回转径向相对位移的检测,同时在夹具的 $x$ 向与 $y$ 向正交布置2个接触式振动加速度传感器,实现对系统的振动加速度检测,5个传感器通过多通道数据采集仪实现同步采样。切削工况下包含系统振动位移分量 $u_x$ 和 $u_y$ 的3个位移传感器的输出信号表达式为

$$\begin{cases} \bar{S}_1(\theta) = e(\theta + \gamma) + r(\theta + \gamma) + [\delta_x(\theta) + u_x(\theta)] \cos \gamma + [\delta_y(\theta) + u_y(\theta)] \sin \gamma \\ \bar{S}_2(\theta) = e(\theta + \alpha) + r(\theta + \alpha) + [\delta_x(\theta) + u_x(\theta)] \cos \alpha + [\delta_y(\theta) + u_y(\theta)] \sin \alpha \\ \bar{S}_3(\theta) = e(\theta + \beta) + r(\theta + \beta) + [\delta_x(\theta) + u_x(\theta)] \cos \beta + [\delta_y(\theta) + u_y(\theta)] \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

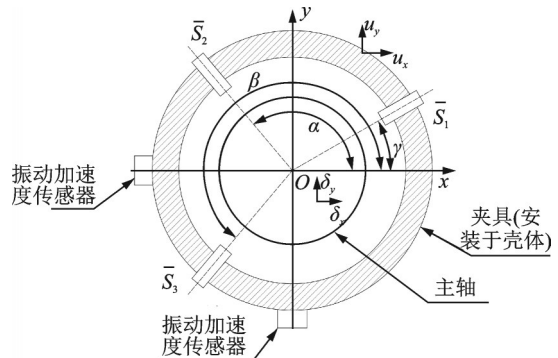


图2 新型三点法回转误差检测方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of new three-point method

## 2 模型求解

### 2.1 新型三点法误差分离

传统三点法没有考虑系统的振动位移分量,只能对包含主轴的回转误差、圆度误差与安装偏心误差的传感器检测信号进行分离,因此需设计对系统振动位移信号的误差分离方法。依据式(2),设计的误差分离过程如下。

#### 2.1.1 振动位移的求解

采用振动加速度传感器实时测量系统的振动信号,其测量值为加速度信号 $a_x$ 和 $a_y$ ,对其进行二次积分,计算得到系统的计算振动位移信号 $\bar{u}_x$ 和 $\bar{u}_y$ 。由于低频衰减频域积分法具有计算精度高、参数选择容错性好等特点<sup>[13]</sup>,故采用低频衰减频域积分法进

行计算。将振动加速度传感器采集到的离散加速度序列  $\{a(i)\} (i=0, 1, \dots, N-1)$  进行离散傅里叶变换, 得到序列  $\{A_c(k)\}$ , 其中:  $k$  为谐波阶次,  $k=0, 1, \dots, N-1$ 。对  $\{A_c(k)\}$  进行频域积分运算

$$\bar{U}(k) = -H(k)A_c(k) \quad (3)$$

其中:  $H(k)$  为低频衰减频响函数。

$H(k)$  具有抑制低频趋势项的作用, 其表达式为

$$H(k) = \frac{(2\pi k \Delta f)^2}{(2\pi k \Delta f)^4 + [(1 - \alpha_T)/\alpha_T](2\pi f_b)^4} \quad (4)$$

其中:  $\alpha_T$  为积分精度系数, 且  $0 < \alpha_T \leq 1$ ;  $f_b$  为振动信号基频;  $\Delta f = F_s/N$ , 为频率分辨率;  $F_s$  为采样频率;  $N$  为采样点数。

对  $\bar{U}(k)$  进行离散傅里叶逆变换 (inverse discrete Fourier transform, 简称 IDFT), 得到振动位移时域信号  $\bar{u}(i)$  为

$$\bar{u}(i) = \text{IDFT}[\bar{U}(k)] \quad (5)$$

### 2.1.2 振动位移的分离

将  $\bar{u}_x(\theta)$  和  $\bar{u}_y(\theta)$  结合式 (2), 可得

$$\begin{cases} s_1(\theta) = e(\theta + \gamma) + r(\theta + \gamma) + \delta_x(\theta) \cos \gamma + \delta_y(\theta) \sin \gamma + \epsilon_1(\theta) \\ s_2(\theta) = e(\theta + \alpha) + r(\theta + \alpha) + \delta_x(\theta) \cos \alpha + \delta_y(\theta) \sin \alpha + \epsilon_2(\theta) \\ s_3(\theta) = e(\theta + \beta) + r(\theta + \beta) + \delta_x(\theta) \cos \beta + \delta_y(\theta) \sin \beta + \epsilon_3(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\epsilon_o(\theta)$  为积分误差项 ( $o=1, 2, 3$ )。

$\epsilon_o(\theta)$  具体表达式为

$$\begin{cases} \epsilon_1(\theta) = [u_x(\theta) - \bar{u}_x(\theta)] \cos \gamma + [u_y(\theta) - \bar{u}_y(\theta)] \sin \gamma \\ \epsilon_2(\theta) = [u_x(\theta) - \bar{u}_x(\theta)] \cos \alpha + [u_y(\theta) - \bar{u}_y(\theta)] \sin \alpha \\ \epsilon_3(\theta) = [u_x(\theta) - \bar{u}_x(\theta)] \cos \beta + [u_y(\theta) - \bar{u}_y(\theta)] \sin \beta \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 只需达到较高的积分精度, 即可有效抑制积分误差项, 此时式 (6) 转化为

$$\begin{cases} s_1(\theta) = e(\theta + \gamma) + r(\theta + \gamma) + \delta_x(\theta) \cos \gamma + \delta_y(\theta) \sin \gamma \\ s_2(\theta) = e(\theta + \alpha) + r(\theta + \alpha) + \delta_x(\theta) \cos \alpha + \delta_y(\theta) \sin \alpha \\ s_3(\theta) = e(\theta + \beta) + r(\theta + \beta) + \delta_x(\theta) \cos \beta + \delta_y(\theta) \sin \beta \end{cases} \quad (8)$$

即得到了 3 个位移传感器相对于主轴的绝对位移数据, 实现了对系统振动位移的有效分离。

### 2.1.3 圆度误差分离

对式 (8) 进行误差分离, 求出圆度误差  $r(\theta)$  与偏心误差  $e(\theta)$ , 将  $e(\theta)$  与  $r(\theta)$  代入式 (8) 前 2 项, 得到

主轴的回转误差  $\delta_x(\theta)$  和  $\delta_y(\theta)$ , 计算过程见文献 [5]。主轴回转误差  $\delta_x(\theta)$  和  $\delta_y(\theta)$  的表达式为

$$\begin{cases} \delta_x(\theta) = \frac{[s_1(\theta) - r(\theta + \gamma) - e(\theta + \gamma)] \sin \alpha}{\sin(\alpha - \gamma)} - \frac{[s_2(\theta) - r(\theta + \alpha) - e(\theta + \alpha)] \sin \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)} \\ \delta_y(\theta) = \frac{[s_1(\theta) - r(\theta + \gamma) - e(\theta + \gamma)] \cos \alpha}{\sin(\gamma - \alpha)} - \frac{[s_2(\theta) - r(\theta + \alpha) - e(\theta + \alpha)] \cos \gamma}{\sin(\gamma - \alpha)} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 误差分离仿真

在实际检测过程中, 圆度误差、偏心误差、回转误差、系统振动位移和系统振动加速度都具有周期性。根据周期性信号的特点, 设计模拟信号对切削工况下的主轴回转误差进行仿真。各仿真信号成分的表达式如下。

被测刀柄表面圆轮廓的圆度误差为

$$r(t) = 25 + 0.3 \sin(2\omega t) + 0.4 \cos(2\omega t) + 0.2 \cos(3\omega t) - 0.7 \cos(6\omega t) + 0.3 \sin(13\omega t) + 0.8 \cos(20\omega t) - 0.5 \sin(27\omega t) \quad (10)$$

安装偏心误差为

$$e(t) = 1.2 \sin \omega t + 0.8 \cos \omega t \quad (11)$$

回转误差为

$$\begin{aligned} \delta(t) = & 2.0 + 0.1 \sin(\omega t + \pi/4) + \\ & 0.5 \cos(2\omega t + \pi/6) + 0.6 \sin(7\omega t + \pi/8) + \\ & 0.3 \cos(12\omega t + \pi/10) + 0.8 \sin(15\omega t + \pi/15) \end{aligned} \quad (12)$$

系统振动加速度分量分别为

$$a_x(t) = 4450 \sin(\omega t) + 17950 \sin(2\omega t) + 14650 \sin(4\omega t) + 15600 \sin(8\omega t) \quad (13)$$

$$a_y(t) = 4100 \sin(\omega t) + 16000 \sin(2\omega t) + 15250 \sin(4\omega t) + 13750 \sin(8\omega t) \quad (14)$$

真实振动位移分量分别为

$$u_x(t) = -[4450/(\omega)^2] \sin(\omega t) - [17950/(2\omega)^2] \times \sin(2\omega t) - [14650/(4\omega)^2] \sin(4\omega t) - [15600/(8\omega)^2] \sin(8\omega t) \quad (15)$$

$$u_y(t) = -[4100/(\omega)^2] \sin(\omega t) - [16000/(2\omega)^2] \times \sin(2\omega t) - [15250/(4\omega)^2] \sin(4\omega t) - [13750/(8\omega)^2] \sin(8\omega t) \quad (16)$$

其中:  $\omega = 2\pi n/60$ ;  $n$  为主轴转速 (r/min); 本次仿真

实验的各项误差均为无量纲量。

设各传感器每周采样点  $N=1\ 024$ , 3个位移传感器与  $x$  轴正向的夹角分别为  $\gamma=0, \alpha=256 \times 2\pi/N$  (rad),  $\beta=427 \times 2\pi/N$  (rad), 主轴转频  $\omega=20$  Hz。图3为使用Matlab编写的新型三点法程序流程图。

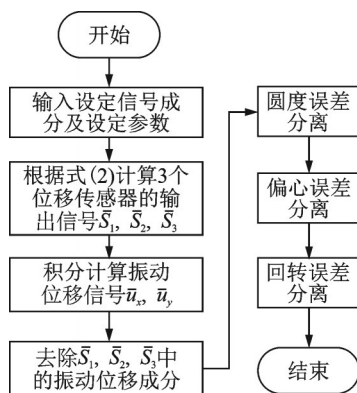


图3 新型三点法程序流程图

Fig.3 The flow chart of new three-point method program

利用模拟圆度误差、回转误差、偏心误差及振动位移信号,依据式(2)计算得到了3个位移传感器的检测位移信号  $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \bar{S}_3$ 。传统三点法圆度误差分离结果、新型三点法圆度误差分离结果以及回转误差分离结果如图4~6所示。

设定的圆度误差为5.403 8、回转误差为3.464 3,

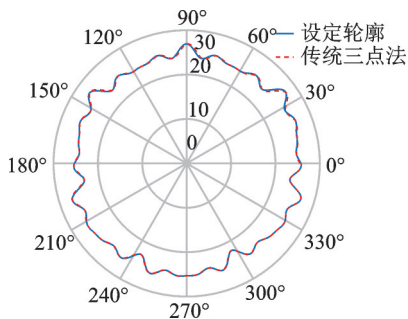


图4 传统三点法圆度误差分离结果

Fig.4 Roundness error separation results of traditional three-point method

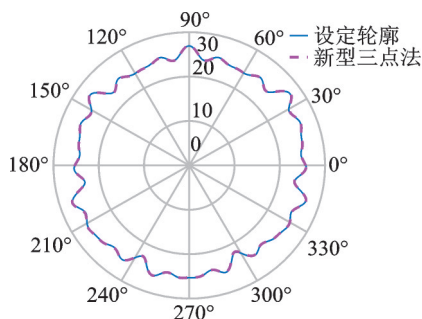


图5 新型三点法圆度误差分离结果

Fig.5 Roundness error separation results of new three-point method

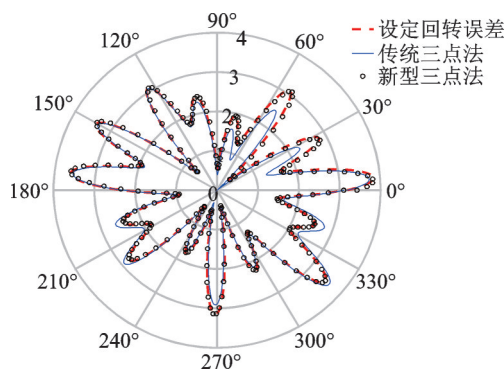


图6 回转误差分离结果

Fig.6 Rotation error separation result

分离仿真效果如表1所示。可见,2种分离方法得到的圆度误差差异很小,而传统三点法分离得到的回转误差与设定的回转误差差异较大,使用新型三点法分离得到的回转误差与设定的回转误差差异明显减小。

表1 分离仿真效果

Tab.1 Separating Simulation Effects

方法	圆度误差	圆度偏差/%	回转误差	回转偏差/%
传统三点法	5.448 8	0.832 7	3.703 9	6.916 2
新型三点法	5.415 3	0.212 8	3.431 8	0.947 0

### 3 实验研究

#### 3.1 实验设备及其主要参数

设计并搭建了切削工况下的主轴轴心轨迹检测平台,使用位移传感器测量刀柄圆柱面的相对位移,使用振动加速度传感器测量传感器夹具的振动加速度信号,对不同主轴转速、不同进给速度、不同切削深度工况下的刀柄径向跳动与位移传感器夹具的振动加速度进行检测。回转误差检测系统总体设计如图7所示。图8为检测系统结构图。图9为回转误

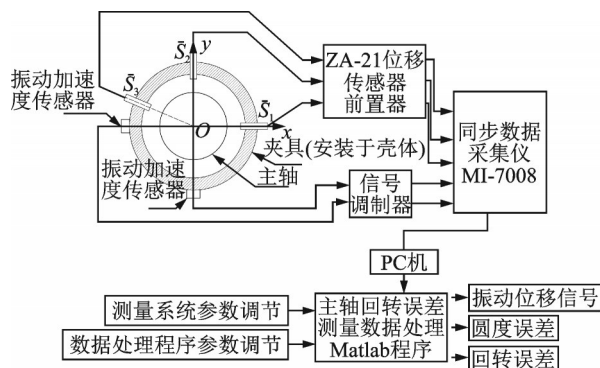


图7 回转误差检测系统总体设计

Fig.7 General design of rotation error detection system

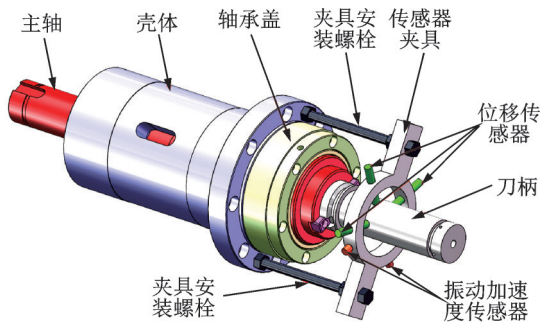
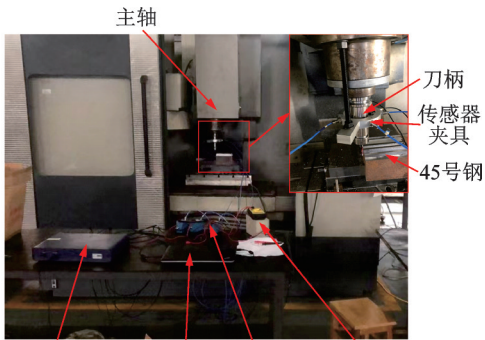


图8 检测系统结构图

Fig.8 Structural diagram of detection system



MI-7008数据采集仪 PC机 前置器 传感器电源

图9 回转误差检测试验台实物图

Fig.9 Picture of rotation error detection test bed

差检测试验台实物图。

设各传感器每周采样点  $N=1\ 024$ , 采样频率根据主轴转速与每周采样点数确定。3个位移传感器的安装角度分别为  $\gamma=0^\circ, \alpha=90^\circ, \beta=157^\circ$ , 2个振动加速度传感器的安装角度分别为  $180^\circ$  和  $270^\circ$ , 每种工况下采集80圈数据。

### 3.2 实验过程

以主轴转速  $S$ 、进给速度  $F$ 、切削深度  $Z$  为研究对象,设计相关测量实验。空转与变转速工况下,主轴转速  $S$  为每  $1\ 200\ \text{r/min}$  变化一次;变进给速度工况下,进给速度为每  $250\ \text{mm/min}$  变化一次;变切深工况下,切削深度为每  $0.25\ \text{mm}$  变化一次。回转误差测量方案如表2所示。

表2 回转误差测量方案

Tab.2 Rotary error measurement scheme

工况	主轴转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	进给速度/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	切深/mm
空载	1 200~6 000	0	0
变转速	1 200~6 000	1 000	1
变进给速度	4 800	500~1 500	1
变切深	4 800	1 000	0.5~1.5

### 3.3 实验结果及分析

得到测量数据后,分别使用笔者提出的新型三点法与传统的三点法分离出各工况下的主轴回转误差与圆度误差。

切削参数  $S=6\ 000\ \text{r/min}, F=1\ 000\ \text{mm/min}, Z=-1\ \text{mm}$  时,去噪后含振动位移的位移传感器信号如图10所示。 $x$ 向和 $y$ 向振动信号积分结果如图11,12所示。分离振动位移后位移传感器信号如图13所示。笔者采用集合平均和小波阈值去噪<sup>[10]</sup>的联合去噪方法对位移传感器信号进行去噪处理。

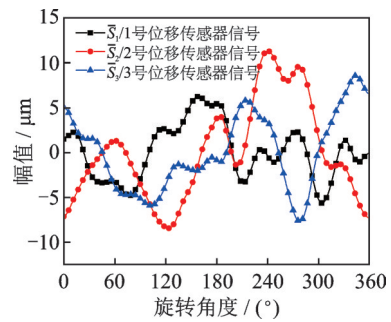


图10 含振动位移的位移传感器信号

Fig.10 Displacement sensor signal with vibration displacement

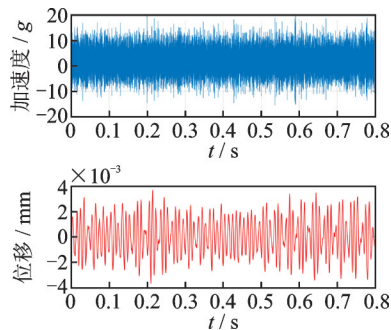


图11  $x$ 向振动信号积分结果

Fig.11  $x$ -direction vibration signal integration result

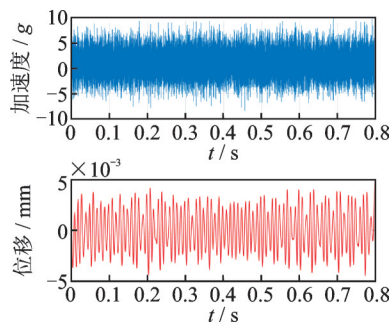


图12  $y$ 向振动信号积分结果

Fig.12  $y$ -direction vibration signal integration result

依据主轴圆度轮廓不变的原理,以图10~13得到的数据为基础,使用传统三点法以及笔者提出的新型三点法对切削参数  $S=6\ 000\ \text{r/min}, F=$

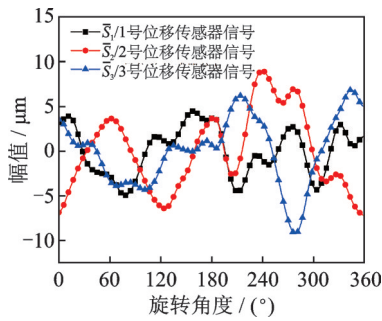


图 13 分离振动位移后位移传感器信号

Fig.13 Displacement signal of displacement sensor after vibration displacement separation

1 000 mm/min, Z=-1 mm 主轴切削工况进行误差分离计算,得到的圆度误差分离结果如图 14 所示。

由图 14 可知,传统三点法与新型三点法的圆度误差分离结果非常吻合,符合主轴圆度轮廓不变的特性,说明位移传感器检测得到的信号中,系统的振动位移信号成分不会影响圆度误差的分离结果,验证了笔者提出的式(2)的正确性。

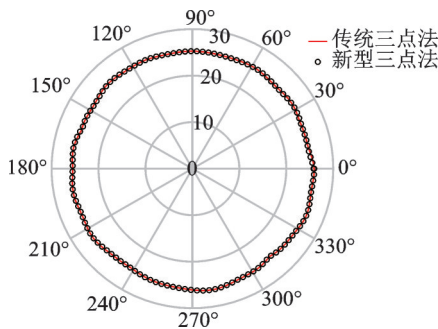


图 14 圆度误差分离结果(单位: μm)

Fig.14 Roundness error (unit: μm)

图 15 为 2 组误差分离实验得到的回转误差分离结果。可见,笔者提出的新型三点法对系统振动引起的检测误差具有很好的抑制效果。切削工况下系统振动引起的检测误差不可忽略。

对空转工况、变转速工况、变进给速度工况和变

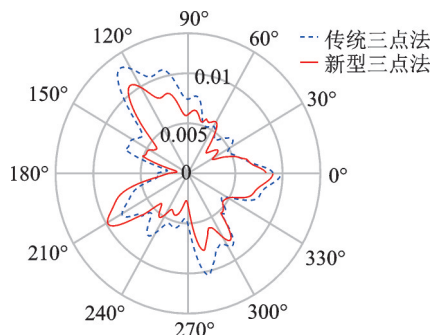


图 15 回转误差分离结果(单位: μm)

Fig.15 Rotation error (unit: μm)

切深工况下的误差分离结果如表 3~6 所示。2 种分离方法在 4 种工况下的回转误差变化折线图如图 16~19 所示。

以上数据的圆度误差变化很小,符合轮廓不变原理。各组分离实验得到的圆度误差在 6.8~7.2 μm 之间,实验采用 BT-40-ER32-150 型刀柄圆柱面标定圆度误差为 7.0 μm,验证了各组误差分离实验的正确性。相同工况下使用传统三点法与笔者提出的新型三点法得到的圆度误差结果相同,进一步验证了所提出的新型三点法的正确性。

表 3 空转工况下误差分离结果

Tab.3 Error separation results of no load

主轴转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	圆度误差/μm		回转误差/μm	
	传统	新型	传统	新型
	三点法	三点法	三点法	三点法
1 200	6.8	6.8	10.6	10.5
2 400	7.0	7.0	11.3	11.0
3 600	7.3	7.3	21.3	15.1
4 800	7.2	7.2	13.5	12.6
6 000	7.0	7.0	15.5	14.1

表 4 变转速工况下误差分离结果

Tab.4 Error separation results of variable speed

主轴转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	圆度误差/μm		回转误差/μm	
	传统	新型	传统	新型
	三点法	三点法	三点法	三点法
1 200	6.8	6.8	25.0	20.1
2 400	6.8	6.8	21.1	17.7
3 600	6.9	6.9	38.6	24.4
4 800	6.9	6.9	15.0	13.7
6 000	7.0	7.0	10.5	9.5

表 5 变进给速度工况下误差分离结果

Tab.5 Error separation results of variable feedrate

进给速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	圆度误差/μm		回转误差/μm	
	传统	新型	传统	新型
	三点法	三点法	三点法	三点法
500	6.8	6.8	12.1	12.0
750	7.0	7.0	13.0	12.4
1 000	7.0	7.0	15.0	13.7
1 250	7.2	7.2	15.9	14.0
1 500	7.0	7.0	17.0	14.5

表 6 变切深工况下误差分离结果

Tab.6 Error separation results of variable cutting depth

切深/mm	圆度误差/μm		回转误差/μm	
	传统	新型	传统	新型
	三点法	三点法	三点法	三点法
0.50	6.8	6.8	10.9	10.6
0.75	6.8	6.8	12.4	11.5
1.00	7.1	7.1	15.0	13.7
1.25	7.2	7.2	17.9	15.9
1.50	7.0	7.0	20.8	17.8

由图16,17可知,主轴转速为3 600 r/min时主轴的回转误差会出现峰值,振动引起的误差差值也会出现峰值,对KVC-800机床进行锤击实验可得该机床的固有频率对应的转速为3 000 r/min与3 840 r/min,主轴转频处于机床的2个固有频率之间。由文献[14]可知,此时机床容易发生震颤现象。主轴空转时,回转误差随着转速增加而逐渐变大;主轴实际切削时,回转误差随着转速增加逐渐减小。这是由于空转时主轴旋转不平衡质量产生不平衡力<sup>[15]</sup>,不平衡力随着转速增加而增大,而在实际切削过程中主轴回转误差产生的主要原因是由于切削力的影响。由切削力的计算公式可知,在进给速度与切深相同的条件下,主轴转速越高,切削力越小,因此回转误差会出现相反的变化规律。

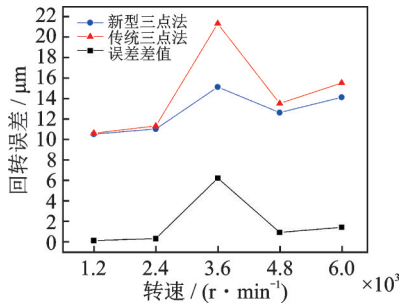


图16 空转工况下回转误差变化折线图

Fig.16 Line chart of rotation error changes under no load

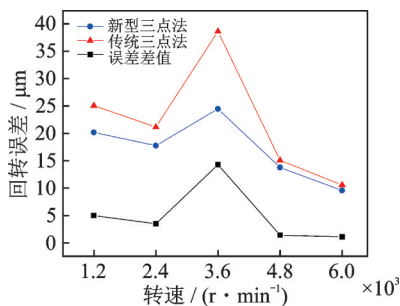


图17 变转速工况下回转误差变化折线图

Fig.17 Line chart of rotation error changes under variable speed

由图18,19可知,主轴的回转误差会随着进给速度与切削深度的增加而增加,且系统振动引起的误差差值也随之增大,这是由于切削力会随着进给速度与切削深度的增加而增大。从以上实验结果可知,主轴空转与实际切削时回转误差产生的主要因素不同,对实际切削的机床主轴进行回转误差检测更能反映主轴的加工精度。

切削工况下振动产生的误差差值随着主轴转速的增加而逐渐减小,随着进给速度与切深的增加而

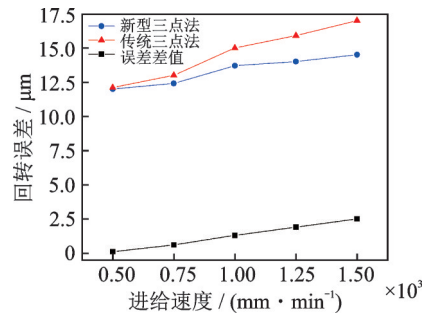


图18 变进给速度工况下回转误差变化折线图

Fig.18 Line chart of rotation error changes under variable feedrate

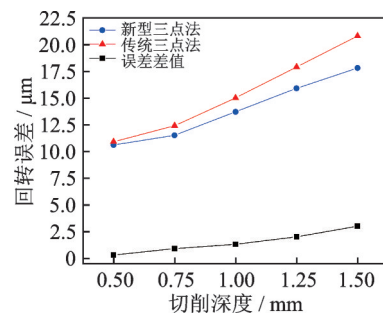


图19 变切深工况下回转误差变化折线图

Fig.19 Line chart of rotation error changes under variable cutting depth

逐渐增大,这反映了切削工况下机床主轴的振动幅度随切削力的增大而上升,在大负载工况下对主轴回转误差进行检测时,系统的振动不可忽略。因此,考虑系统振动的新型三点法可实现大负载工况下对主轴回转误差的有效检测。

## 4 结论

1) 针对切削工况下对主轴进行回转误差检测的问题,分析了系统振动对回转误差检测的影响机理,得到了考虑系统振动影响下的三点法回转误差检测数学模型。

2) 提出了加入振动加速度传感器的新型三点法回转误差检测方法,使用低频衰减频域积分方法对振动加速度信号进行积分,得到检测系统的振动位移信号,并结合传统三点法设计了可对系统振动位移、主轴圆度误差、安装偏心误差和主轴回转误差进行有效分离的误差分离方法。

3) 研制了一套主轴在切削工况下的回转误差检测装置并进行了检测实验。实验得到的主轴圆度误差在6.8~7.2 μm之间,与实验采用的BT-40-ER32-150型刀柄圆柱面的出厂标定圆度误差为7.0 μm,验证了所提出方法对切削工况下电主轴进行回转误差在

线检测的准确性。

4) 对不同工况下的主轴回转误差进行检测,得到切削时主轴回转误差随切削参数的变化规律,为提高主轴加工精度提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 熊万里,原帅,胡灿,等.液体静压主轴的回转精度规律及其极限预测[J].机械工程学报,2021,57(13):70-82.  
XIONG Wanli, YUAN Shuai, HU Can, et al. The laws and ultimate prediction of rotation accuracy for hydrostatic spindle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 70-82. (in Chinese)
- [2] 马会防,万召.轴心轨迹测量中圆弧形导致的偏差及其修正方法[J].振动与冲击,2019,38(24):243-248.  
MA Huifang, WAN Zhao. Deviation caused by circular arc in axis orbit measurement and its modification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 243-248. (in Chinese)
- [3] GREJDA R, MARSH E, VALLANCE R. Techniques for calibrating spindles with nanometer error motion[J]. Precision Engineering, 2005, 29(1): 113-123.
- [4] 谭久彬,赵维谦,杨文国.改善多步法谐波抑制的新方法—鉴相法[J].中国机械工程,2001(S1):161-162.  
TAN Jiubin, ZHAO Weiqian, YANG Wenguo. A new error separation method: phase-distinguish method to improve multi-step error separation method [J]. China Mechanical Engineering, 2001(S1): 161-162. (in Chinese)
- [5] 洪迈生,魏元雷,李济顺.一维和多维误差分离技术的统一理论[J].中国机械工程,2000,11(3):245-248.  
HONG Maisheng, WEI Yuanlei, LI Jishun. Unified theory of one-dimension and multi-dimension error separation techniques [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(3): 245-248. (in Chinese)
- [6] 周继昆,张荣,凌明祥.基于三点法的机床主轴回转误差在线测试技术研究[J].计算机测量与控制,2018,26(3):58-61,102.  
ZHOU Jikun, ZHANG Rong, LING Mingxiang. Study on the online test of spindle's radial error of machine tool base on three point method [J]. Journal of Computer Measurement and Control, 2018, 26(3): 58-61, 102. (in Chinese)
- [7] 梁霖,刘飞,徐光华,等.基于几何动态模型的圆度误差分离模拟[J].振动、测试与诊断,2014,34(1):27-32.  
LIANG Lin, LIU Fei, XU Guanghua, et al. Study of roundness error separation based on dynamic geometric model [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(1): 27-32. (in Chinese)
- [8] 冯明,杜德渝,王新杰,等.精密主轴回转误差和刚度测试技术研究[J].机械工程学报,2021,57(13):18-25.  
FENG Ming, DU Deyu, WANG Xinjie, et al. Research on measurement technology of precision spindle rotation error and stiffness [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 18-25. (in Chinese)
- [9] HUANG R, PAN W, LU C, et al. An improved three-point method based on a difference algorithm [J]. Precision Engineering, 2020, 63: 68-82.
- [10] 金岸,缪寅宵,刘冬冬,等.主轴动态回转误差测量技术[J].光学精密工程,2020,28(10):2227-2243.  
JIN An, MIAO Yinxiao, LIU Dongdong, et al. Research on spindle dynamic rotation-error-measurement technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2227-2243. (in Chinese)
- [11] 张洁,刘成颖,郑烽,等.基于铣削动力学的刀具强迫振动抑制研究[J].机械工程学报,2018,54(17):94-99.  
ZHANG Jie, LIU Chengying, ZHENG Feng, et al. Research on suppression of the forced vibration of the cutter based on the milling dynamics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 94-99. (in Chinese)
- [12] 郑烽.负载条件下机床主轴动态精度测量方法研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [13] HONG Y H, KIM H K, LEE H S. Reconstruction of dynamic displacement and velocity from measured accelerations using the variational statement of an inverse problem [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(23): 4980-5003.
- [14] 高峰,程明科,李艳,等.永磁同步型磨削电主轴偏心振动分析及实验[J].仪器仪表学报,2019,40(2):38-50.  
GAO Feng, CHENG Mingke, LI Yan, et al. Eccentric vibration analysis and test of permanent magnet synchronous grinding motorized spindle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 38-50. (in Chinese)
- [15] 胡灿,熊万里,孙文彪,等.可控节流液体静压主轴回转精度提升的机理研究[J].机械工程学报,2019,55(11):160-168.  
HU Can, XIONG Wanli, SUN Wenbiao, et al. Research on the mechanism of improving hydrostatic spindle rotating accuracy with controllable restrictor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 160-168. (in Chinese)



**第一作者简介:**蒋冠,男,1995年8月生,硕士生。主要研究方向为绿色高效精密加工与智能制造、高速电主轴回转误差检测。

E-mail:1045360265@qq.com

**通信作者简介:**康辉民,男,1975年1月生,博士、教授、硕士生导师。主要研究方向为磁悬浮轴承技术、机器人技术、数字化与智能制造技术。

E-mail:xykanghm@163.com