

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.02.008

基于多步误差分离法的主轴回转误差检测方法

迟玉伦, 王国强*

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要:为高效快速获得高精度数控铣床主轴工作时的回转误差,笔者提出了基于数理统计法与位移信号的多步误差分离方法。设计了一套包含 x 向和 y 向的2个电涡流传感器以及1个光电编码器的测量装置,并使用数据采集卡对传感器和光电编码器进行同步数据采集;设置不同的采样率,使主轴在不同的转速下,每圈的采样点数保持一致;在不借助标准球或者标准棒的情况下对数控铣床的主轴外轮廓进行直接测量,避免标准球或标准棒在安装过程中引入的安装误差和主轴运行时的轴向窜动对测量造成影响;根据误差特性将传感器采集到的混合误差(主轴原始数据)进行逐步分离(消除白噪声和主轴形状误差),最终得到准确的数控铣床主轴回转误差。通过使用美国Lion Precision主轴回转误差分析仪验证了所求主轴回转误差的准确性。该主轴回转误差分离方法能够在不借助标准球或标准棒的情况下,完成对工况下主轴回转误差数据的采集与处理,进而方便、高效地获得比较精确的主轴回转误差。

关键词:主轴回转误差;多步法;主轴形状误差;数理统计;位移信号;误差分离

中图分类号:TH133.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)02-0048-10

Research on Spindle Rotation Error Detection Method Based on Multi-Step Error Separation Method

CHI Yulun, WANG Guoqiang*

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to obtain the rotation error of high precision CNC milling machine spindle efficiently and quickly, a multi-step error separation method based on mathematical statistics and displacement signal was proposed. A set of measuring device including two eddy current sensors in x and y direction and a photoelectric encoder was designed; the data acquisition card was used for simultaneous data acquisition of sensor and photoelectric encoder; different sampling rates were set to maintain the consistent number of sampling points in each turn of the spindle at different speeds; the external contour of the spindle of the CNC milling machine was directly measured without the help of the standard ball or standard bar to avoid the influence of the installation error introduced in the installation process of the standard ball or standard bar and the axial movement of the spindle during operation on the measurement; according to the error characteristics, the mixed error (the original data of the spindle) collected by the sensor was gradually separated (eliminating white noise and the shape error of the spindle), and finally the accurate spindle rotation error of the CNC milling machine was obtained. The accuracy of the spindle rotation error was verified by using the American Lion Precision spindle rotation error analyzer. The spindle rotation error separation method can complete the collection and processing of spindle rotation error data under working conditions without the help of standard ball or standard bar, thus obtaining relatively accurate spindle rotation error conveniently and efficiently.

Keywords: spindle rotation error; multistep; spindle shape error; mathematical statistics; displacement signal; error separation

收稿日期:2022-08-29;修回日期:2023-01-05

基金项目:国家自然科学基金:生命周期性能与可靠性多尺度融合的数控装备能量优化设计理论及方法研究(51605294)。

第一作者简介:迟玉伦(1983),男,黑龙江穆棱人,博士,副教授,主要研究方向为现代制造技术。通信作者:王国强(1995),男,河北承德人,硕士研究生,主要研究方向为现代制造技术。E-mail:1405737101@qq.com

随着现代机械加工技术的发展,数控机床已经成为机械加工的重要力量。数控机床主轴作为数控加工中心的核心,是确保机床加工精度的重要部件^[1]。由于数控机床主轴长期在高速、高负荷、高功率的情况下运行,所以很容易产生疲劳磨损、裂纹等故障,恶化主轴性能,降低主轴的回转精度^[2],进而影响工件的加工质量。因此需要快速准确地测量出主轴回转误差,如不达标及时更换或者调整处于亚健康状态的主轴。此举对提高工件的加工质量和合格率具有重要意义。

目前,主轴回转误差的测量方法分为2种:一种是静态法^[3],其操作比较简单,但是不能够对误差进行分离,所以实际参考价值比较低;另外一种动态法,动态法通常会在被测主轴上固接一个标准球或者标准棒,通过对主轴上标准球或标准棒的测量来间接获得主轴的回转误差^[4-5]。动态法可以分离出不同性质的误差,精度较好,使用较为广泛。常见的动态法主要有反转法、多点法和多步法。多位学者针对动态测量主轴回转误差进行了深入研究。景岗等^[6]通过单点双向测量法实现了对气体润滑轴承主轴部件回转误差的高精度测量。国防科技大学的黄长征等^[7]采用2点法,通过2个电容传感器测量超精密车床主轴的动态回转误差,并建立了超精密车床主轴回转精度动态测试系统。电子科技大学李迅波等^[8]在主轴上安装标准球后应用计算机辅助测试技术,提出了一种高精度主轴回转误差在线测量方法,并开发了在线测量和数据处理系统。中国工程物理研究院的彭万欢等^[9]指出了消除偏心时的一些误区,并提出了合适的偏心消除方法,设计了偏心调整装置;运用2点法测量超精密空气主轴径向回转误差,该方法采用的误差分离技术能够区分测量结果中不同性质的误差分量,有效提高了主轴回转误差测量的精度。广东工业大学的马平等^[10]通过多步法和数理统计法对位移传感器采集的数据进行分离,得到主轴的径向回转误差和圆度误差。上海交通大学苏恒等^[11]提出先用频域法确定圆度误差的误差初值,然后用时域3点法测量数控机床主轴回转误差并用实验验证了该方法的有效性和精确性。上述研究成果多是通过实验台的设置来测量主轴的回转精度,而测量时大都借助于标准球或标准棒来间接测量主轴的回转精度;传感器的安装往往很难达到测

试所需的安装精度^[12],从而影响到主轴回转误差分离的准确性。因此需要研究更加快速有效的主轴回转精度检测方法。

考虑到获取主轴回转误差数据的复杂性,为了快速有效地获得高精密度数控铣床主轴的回转误差,笔者设计了一套基于数理统计法与位移信号的多步误差分离方法;在不借助标准球或者标准棒的情况下对数控铣床的主轴外轮廓进行直接测量,从而避免标准球或标准棒在安装过程中引入的安装误差和主轴运行时的轴向窜动对测量造成的影响;然后根据误差特性将传感器采集得到的混合误差进行逐步分离,最终得到准确的数控机床主轴回转误差,实现对主轴回转精度的检测。

1 多步法主轴回转误差分离方法

基于主轴回转误差传感器采集系统特性^[13],由于各种因素的影响,传感器采集得到的是各种信号混合在一起的原始数据,该原始数据信号中包含随机误差、主轴轴向窜动的影响、主轴形状误差和主轴回转误差。笔者采用多步法对原始数据进行数据分离处理,最终得到主轴回转误差,其误差分离过程如图1所示。

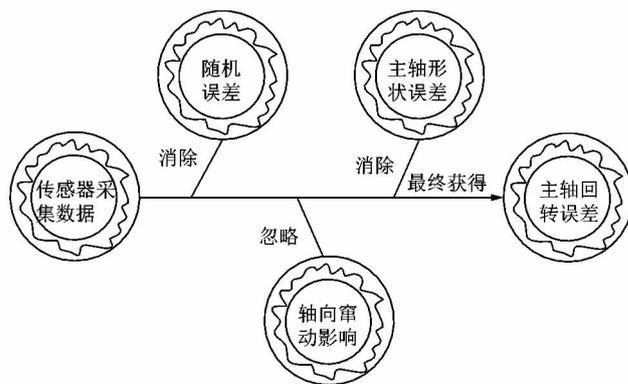


图1 误差分离过程

Figure 1 Schematic diagram of error separation technology

从图1可知,要想获得准确的回转误差数据,就必须将原始数据中混入的白噪声、主轴轴向窜动和主轴形状误差分离出来。随机误差即白噪声,可以通过多圈数据集平均的方法进行消除。轴向窜动主要会引起位移传感器测量位置的变化,但由于该多步法是对主轴的外轮廓直接测量未使用标准球,所以可以忽略

因为轴向窜动所引起的主轴径向位移量^[14],然后使用数理统计法分离出准确的形状误差,最终获得准确的主轴回转误差,其数据处理流程如图2所示。

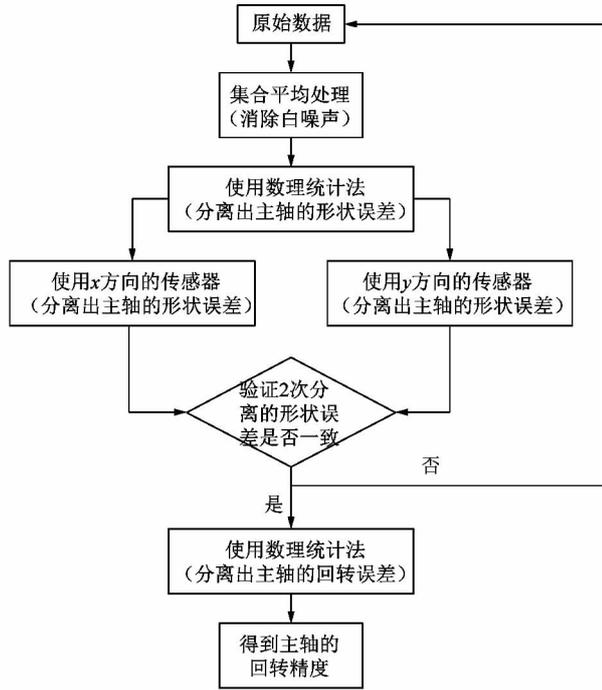


图2 数据处理流程图

Figure 2 Data processing flow chart

1.1 消除数据中的白噪声

在使用多步法进行误差分离的过程中,采集卡所收到的原始数据会因为电磁辐射干扰噪声、电源干扰噪声和接地回路噪声等产生白噪声即随机误差^[15]。为了能够得到更加精确的主轴回转误差数据,需根据白噪声的特性,通过多圈数据的集合平均的方法来消除采集过程中所混入的随机误差。白噪声的表达式为:

$$E[X(t)] = 0(1); \quad (1)$$

$$E[X^2(t)] < \infty。 \quad (2)$$

式中: $X(t)$ 为白噪声信号; E 为数学期望;式(2)是白噪声的均方差,为一个常数。

1.2 使用数理统计法分析主轴的形状误差

主轴形状误差分离:将2个电涡流传感器分别安装到主轴的 x 方向和 y 方向上进行数据采集;然后在主轴的外圆轮廓通过光电编码器等相位标记 N 个点,对旋转中的主轴连续采集 M 转,这样2个传感器都采集到了 $N \times M$ 个原始数据点;选择直接对主轴的外轮

廓进行测量,如此可以忽略轴向窜动对径向跳动的影响;通过集合平均的方法消除了随机误差,余下的误差类型主要为主轴的形状误差和回转误差^[16-17]。数据处理流程图如图3所示。

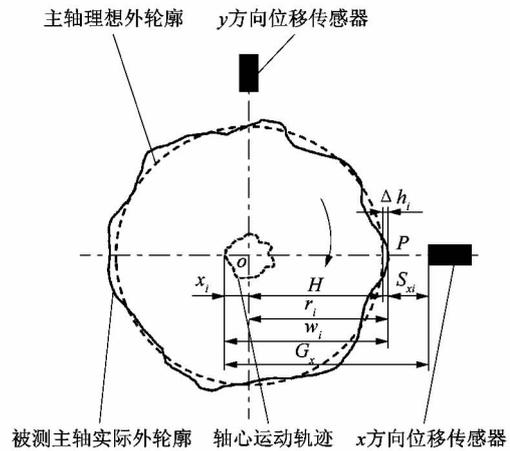


图3 数据处理流程图

Figure 3 Schematic diagram of separation principle

将 x 方向的传感器和 y 方向的传感器的交点设为坐标原点 o ,在采样的过程中,对于每个采样点都有:

$$w_i = x_i + r_{(i \bmod N)}, (i = 1, 2, 3, \dots, N \times M)。 \quad (3)$$

式中: w_i 为 x 轴正方向于主轴外轮廓的交点 P 到实际轴心的距离在 x 方向上的投影; x_i 为主轴回转误差在 x 轴上的投影; r_i 为主轴的形状误差数据,为周期信号。

$$r_i = H + \Delta h_{(i \bmod N)}, (i = 1, 2, 3, \dots, N \times M)。 \quad (4)$$

式中: H 为理想的主轴外轮廓的半径; Δh_i 为主轴形状误差在 x 轴方向的投影。

N 为每圈的采样点数,在 M 圈中相同标记点的数据相加求平均值,则由式(3)~(4)可得:

$$\frac{\sum_{m=1}^M w_{(i+N \times m)}}{M} = \frac{\sum_{m=1}^M x_{(i+N \times m)}}{M} + \frac{M \times H}{M} + \frac{M \times \Delta h_i}{M}, \quad (5)$$

$(i = 1, 2, 3, \dots, N)。$

当采集的圈数足够多时,式(5)中的 $\frac{\sum_{m=1}^M x_{(i+N \times m)}}{M}$

将无限接近于一个常量 L 。则有:

$$r_i = \frac{\sum_{m=1}^M w_{(i+N \times m)}}{M} - L, (i = 1, 2, 3, \dots, N)。 \quad (6)$$

此时引入传感器在 x 方向上所采集的数据 S_{xi} , 则有:

$$w_i = G_x - S_{xi}, (i = 1, 2, 3, \dots, N \times M)。 \quad (7)$$

式中: G_x 为 x 轴方向上传感器与坐标原点 o 的距离。 S_{xi} 为传感器在 x 方向上采集的数据。

$$S_x = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} S_{xi}}{M \times N}; \quad (8)$$

$$L = \frac{\sum_{i=0}^{M \times N} x_i}{M \times N}。 \quad (9)$$

式中: S_x 为数据 S_{xi} 中的直流分量; L 为主轴回转误差 x_i 中的直流分量。

通过式(4), 式(8) ~ (9) 可得:

$$r_i = H + \Delta h_i; \quad (10)$$

$$S_{xi} = S_x + \Delta S_{xi}; \quad (11)$$

$$x_i = L + \Delta x_i。 \quad (12)$$

式中: r_i 为形状误差数据, Δh_i 为形状误差 r_i 消除其直流分量后的部分; ΔS_{xi} 为数据 S_{xi} 消除其直流分量后的部分; Δx_i 为回转误差 x_i 消除其直流分量后的部分。

$$r_i = H + \Delta h_i = \frac{\sum_{m=1}^M [G_x - S_{(x, i+N \times m)}]}{M} - \frac{\sum_{m=1}^M x_{(i+N \times m)}}{M}; \quad (13)$$

$$r_i = G_x - \frac{\sum_{m=1}^M S_{(x, i+N \times m)}}{M} - L = G_x - S_{xi} - L。 \quad (14)$$

由式(13) ~ (14) 可得:

$$\Delta h_i = G_x - H - L - S_{xi}, (i = 1, 2, \dots, N); \quad (15)$$

$$G_x = L + H + S_x。 \quad (16)$$

由式(15) ~ (16) 得

$$\Delta h_i = S_x - S_{xi} = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} S_{xi}}{M \times N} - \frac{\sum_{i=1}^M S_{(x, i+N \times m)}}{M}, (i = 1, 2, \dots, N)。 \quad (17)$$

由于 x 向和 y 向采集的数据分析出来的形状误差是一致的^[18], 所以只由 1 个方向上的传感器采集的数据就可以计算得到主轴外轮廓的形状误差 Δh_i 。

1.3 主轴回转误差计算

通过上节的数理统计法, 得到了主轴外轮廓的形

状误差, 接着进行主轴回转误差的计算, 使用 x 方向的传感器在不同转速下对主轴轮廓进行连续数据采集得到原始数据 S'_{xi} 。

$$x' = w'_i - H - \Delta h_{i \text{mod} N}, (i = 1, 2, \dots, N \times M)。 \quad (18)$$

将式(7)、(10) 和(12) 代入式(18), 则有:

$$L + \Delta x'_i = w'_i - r_{i \text{mod} N} = G_x - S'_{xi} - H - \Delta h_{i \text{mod} N}, (i = 1, 2, \dots, N \times M)。 \quad (19)$$

由式(16) 和(19) 可得

$$\Delta x'_i = S'_x - S'_{xi} - \Delta h_{i \text{mod} N} = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} S'_{xi}}{N \times M} - S'_{xi} - H - \Delta h'_{i \text{mod} N}, (i = 1, 2, \dots, N \times M)。 \quad (20)$$

通过上文已经得到的主轴外轮廓的形状误差 Δh_i 和 x 方向上采集的原始数据经过预处理后得到的 S'_{xi} , 即可分离出实际主轴回转误差在 x 轴方向上的分量 $\Delta x'_i$ 。

同理, 当使用 2 个电涡流传感器分别在 x 方向和 y 方向同步对主轴的外轮廓进行测量时, 获得 2 个方向上的主轴原始数据 S'_{xi} 和 S'_{yi} , 进行去噪处理, 然后分别消除主轴外轮廓的形状误差即可获得主轴回转误差在 x 方向和 y 方向的分量 $\Delta x'_i$ 和 $\Delta y'_i$ 。根据两者可以得到主轴回转中心的二维运动轨迹以及其圆形图像。

1.4 主轴回转误差的评定方法

为了得到回转误差圆的图像, 将上文中求出的主轴回转误差数据叠加到基圆上, 并将叠加后基圆的圆度误差值作为主轴回转精度。这里采用最小二乘法^[18-19] 对该圆进行圆度误差评定。

1.4.1 求最小二乘圆的圆心坐标 (a, b)

$$a = \frac{2 \sum_{i=1}^N \Delta x_i}{N}, b = \frac{2 \sum_{i=1}^N \Delta y_i}{N}; \quad (21)$$

$$R = \frac{2 \sum_{i=1}^N \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2}}{N}。 \quad (22)$$

式中: Δx_i 和 Δy_i 分别为主轴外轮廓上各个采用点处回转误差的直角坐标; R 为最小二乘圆^[20] 的半径; N 为传感器在主轴外轮廓上的采样点数。

1.4.2 求回转误差圆上各个点到所求圆心 (a, b) 的距离

$$R_i = \sqrt{(\Delta x_i - a)^2 + (\Delta y_i - b)^2} \quad (23)$$

1.4.3 计算回转误差圆图像的圆度误差值

$$\varepsilon = R_{i\max} - R_{i\min} \quad (24)$$

式中 ε 即为主轴的回转误差^[21]。

2 数控铣床主轴回转误差测试系统

2.1 测试系统的硬件组成(实验设置)

笔者提出了基于多步法的快速主轴回转误差分离方法,为了验证该方法的可靠性和有效性,对数控铣床的主轴进行了验证实验。如图 4 和图 5 所示,本实验采用 i5 数控立式铣床的主轴作为测试对象。

测试系统的硬件部分包括:①数据采集卡(型号为 PC104);②2 个电涡流传感器(型号 KD2306-2U,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$);③光电编码器(LFC-102.4BM-C05L);④信号转换器;⑤24 V 直流供电电源。

软件部分:WinDaq 软件(该软件可以提供一个实时记录环境,包括零延迟,实时显示,同时将数据记录到磁盘)。按照图 4 的传感器安装方式,在 x 轴方向和 y 轴方向分别安装 1 个电涡流位移传感器,进行数据采集。

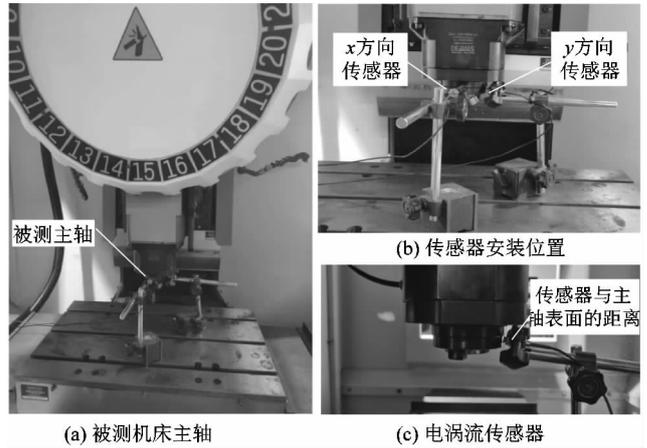
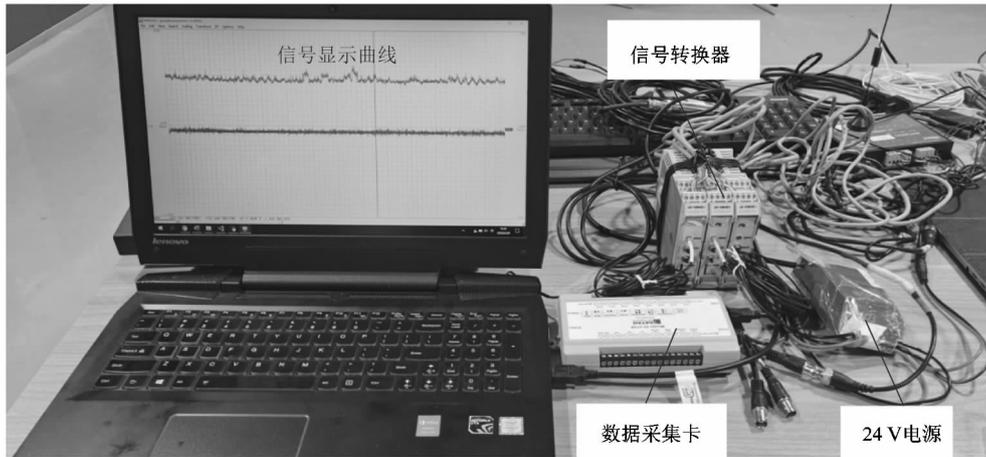


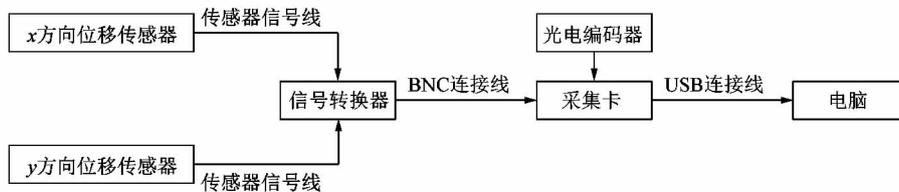
图 4 现场安装图

Figure 4 Site installation drawing

笔者利用位移传感器、信号转换器、USB 数据采集卡和电脑等设备搭建信号采集系统。传感器将采集到的位移信号通过信号线传递给信号转换器,再使用 BNC 连接线与采集卡连接,采集卡通过 USB 线与电脑连接,最终将信号传递给电脑。使用 WinDaq 采集软件设置采集卡,每个通道的采样频率为 1 kHz ,将采集系统部署完毕后即可实现对运行中的主轴进行连续且实时的数据采集。数据采集如图 5 所示。



(a) 现场数据采集系统图



(b) 数据采集流程图

图 5 数据采集

Figure 5 Data acquisition diagram

根据以上采集流程,使用采集卡同时采集 2 个电涡流传感器以及光电编码器的信号,保证光电编码器输出的脉冲信号与电涡流传感器测量信号同步;并通过设置采样率的不同,让 2 个转速下的每一圈的采样点数一致,可以方便地找到不同转速下采样点的对应位置以进行数据处理。以主轴空载时 200 r/min 的数据和主轴工作情况下 400 r/min 的数据进行数据分析。

传感器采集的信号中包含了白噪声、主轴形状误差和主轴回转误差。笔者通过多步法进行数据处理,其中白噪声是随机误差,采集多圈数据进行集合平均即可消除;保证余下的误差形式为形状误差和回转误差,最后使用数理统计法进行误差分离即可得出准确的回转误差精度。

2.2 数据处理

在数据处理前为了更好地看到误差分离的效果,首先对采集的 x 方向的原始数据进行圆拟合,得到如图 6(a) 所示参差不齐的圆形轮廓;为了更清晰地看到原始数据的波动情况,根据原始数据获得如图 6(b) 所

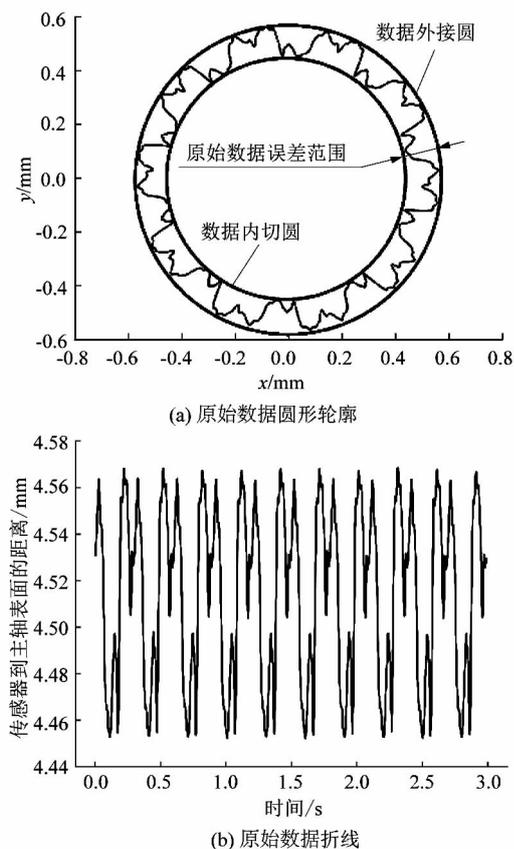


图 6 原始数据

Figure 6 Original data

示的折线图。从图中可以看出原始数据的波动在 4.452 ~ 4.565 mm 之间,差值为 0.1 mm,这个差值就是包含了白噪声、主轴形状误差和主轴回转误差的原始误差。

2.2.1 消除白噪声

按照图 2 所示的流程对原始数据先进行数据预处理,通过多圈集合平均的方式消除白噪声。图 7(a) 为集合平均处理后得到的折线图;图 7(b) 为去除白噪声后的数据拟合的主轴外圆轮廓。文中为了更清楚看到数据的波动情况去掉了原数据的直流分量。

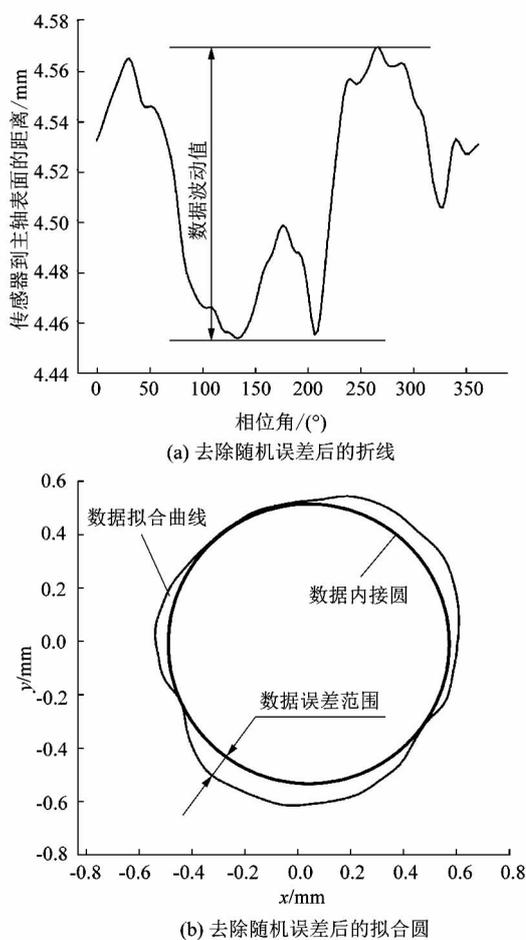


图 7 去掉随机误差后的数据

Figure 7 Data chart after removing random error

2.2.2 求对应点的形状误差

根据 1.3 中的方法对主轴的形状误差进行计算,得到如图 8 所示的形状误差数据,其中图 8(a) 为一圈中 120 个采样点分别对应的形状误差;图 8(b) 是将 120 个形状误差体现在一个半径为 0.6 mm 的基圆上

所呈现出来的圆形轮廓。

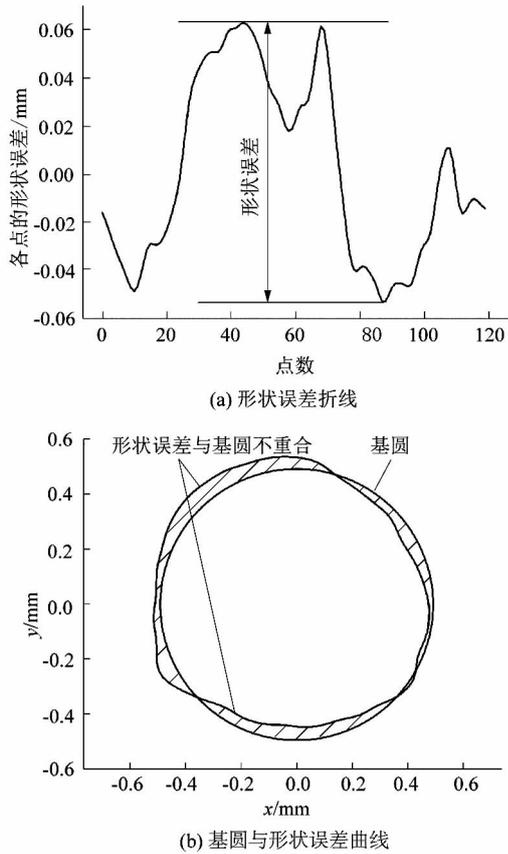


图 8 形状误差数据

Figure 8 Shape error datum

从图 8(a) 可以看出形状误差波动在 $-0.045 \sim 0.065$ mm 之间, 即主轴形状误差的最大值为 0.065 mm; 同理对 y 方向采集的原始数据进行以上步骤可以得到各点的形状误差, 得到主轴外轮廓的形状误差为 $-0.057 \sim 0.061$ mm。通过对 x 方向和 y 方向上对应采样点上数据的分析, 可知 2 个方向上得到的形状误差范围基本一致, 且对应点的形状误差相差的最大值为 0.001 mm, 因此可以认为 2 个方向上分离的形状误差是一致的。对于同一个主轴无论在那个方向上采集的数据其分离出来的形状误差都应该是一个定值, 所以可以确定分离出的形状误差是准确的。

2.2.3 主轴的回转误差评定及结果分析

经过上面 2 个步骤, 已经将原始数据中的白噪声去除, 也求出了对应点的形状误差。现将去噪后的 x 轴数据去掉对应点的形状误差, 即可得到回转误差在 x 轴方向的分量; 同理可得到主轴回转误差在 y 轴方

向的分量。将 2 者对应点进行合成可得到二维的回转中心轨迹。为了能够更清楚直观地看到主轴回转误差的波动情况, 在基圆(半径为 0.1 mm)上叠加所求得的主轴回转误差数据, 即可获得如图 9 所示的回转误差图像, 此时的平均回转误差为 $8.85 \mu\text{m}$ 。

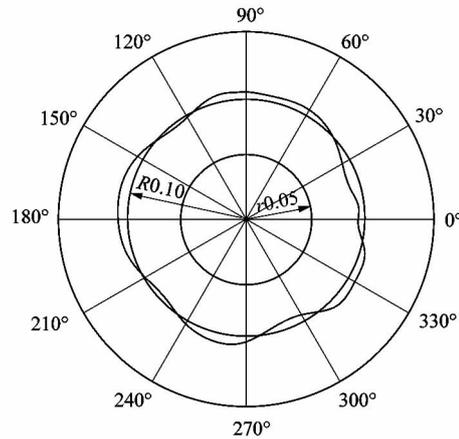


图 9 回转误差图像

Figure 9 Image of rotation error

在第 1 阶段, 在主轴低速空载的情况下, 通过数据采集卡采集各个通道的数据, 并使用光电编码器确定数据的对应位置, 对数据进行集合平均消除白噪声, 最终获得主轴准确的形状误差。第 2 阶段, 在主轴工作的情况下采集数据, 采用和第 1 阶段相同的方式进行处理。首先对采集到的数据进行预处理, 即消除随机误差和轴向窜动, 然后消除第 1 阶段测得的主轴外轮廓的形状误差, 从而得到准确的主轴回转误差, 分离的结果如表 1 所示。

表 1 主轴不同转速下的回转误差

Table 1 Rotation error of spindle at different speeds

主轴转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	形状误差/ μm	回转误差/ μm
100	50	8.32
200	52	8.85
400	50	9.03
800	53	9.11
1 200	51	10.15
1 600	51	11.21

2.3 主轴回转误差结果的验证

笔者使用美国 Lion Precision 主轴回转误差分析仪^[23]对同一个数控机床主轴的回转误差进行测量, 将

测量得到的数据与表 1 中的数据进行对比来验证上述实验数据是否准确。

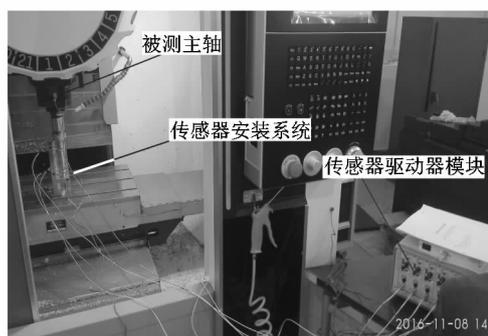
2.3.1 主轴回转误差分析仪的安装

根据美国 Lion Precision 主轴回转误差分析仪的使用手册对同一 i5 数控立式铣床的主轴进行测量,其测量系统如图 10 所示。测试系统的软硬件组成:①精密的标准棒目标(具有纳米级的圆度);②5 个电容式位移传感器探头(型号 C5S,5 mm 圆柱形);③标准的 5 探头安装巢;④Elite 精英系列电容位移传感器驱动器模块(型号 CPL290 最高分辨率 0.06 nm);⑤Elite 精英系列电容位移传感器显示模块(型号 MM190)。

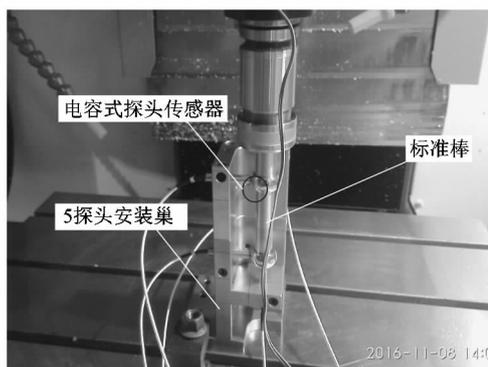
为了精确地测量出被测主轴的回转误差数据,首先将精密的标准棒目标直接安装在 i5 数控机床主轴上;然后将 5 个电容式位移传感器探头依次固定在安装巢的精确位置上,如图 10(b)所示;最终,利用一根 USB 电缆将传感器在主轴工况下采集的数据传递给基于 PC 的处理软件上,通过该软件对传感器所采数据的分析与处理,从而得到被测主轴准确的回转误差数据。

2.3.2 回转误差数据的采集

根据上述回转误差测试系统,使用主轴回转误差分析仪对同一 i5 数控立式铣床的主轴在不同转速下进行测量,分别得到不同转速下主轴的回转误差数据。



(a) 分析仪测量系统



(b) 传感器安装系统

图 10 回转误差分析仪现场安装图

Figure 10 Site installation diagram of rotation error analyzer

图 11 所示为 800 r/min 时主轴回转轨迹图,图中 2 个标准圆中间即为主轴运行时的波动范围。

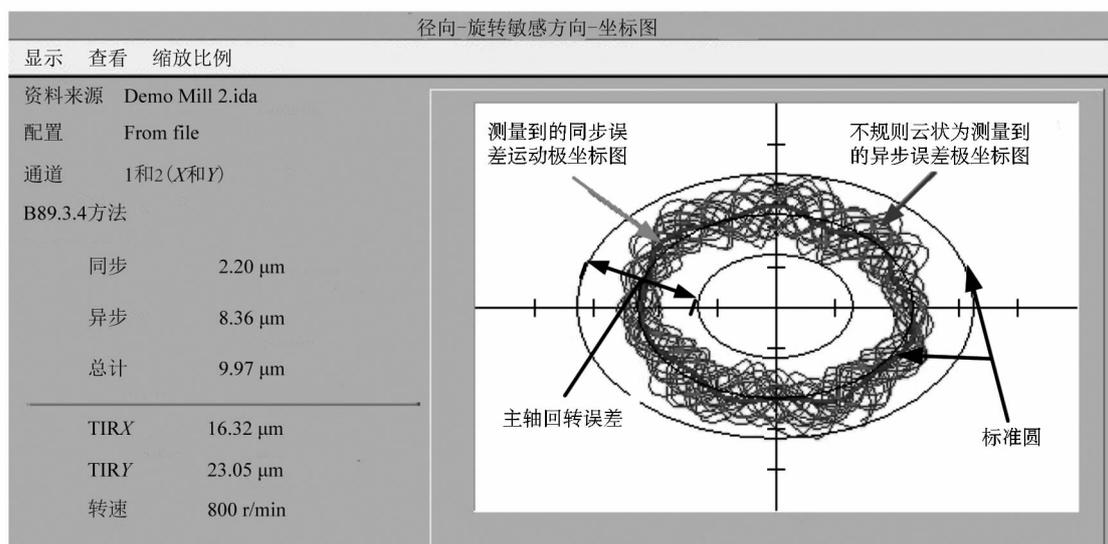


图 11 主轴回转误差结果显示

Figure 11 Display of spindle rotation error results

2.3.3 主轴回转误差数据的结果分析

通过使用美国 Lion Precision 主轴回转误差分析仪对同一个数控机床主轴在不同转速下进行测量,得到不同转速下主轴的回转误差数据,如表 2 所示。

表 2 不同转速下主轴的回转误差

Table 2 Spindle rotation error at different speeds

主轴转速/ (r · min ⁻¹)	回转误差/μm	主轴转速/ (r · min ⁻¹)	回转误差/μm
100	7.06	800	9.76
200	8.34	1 200	9.97
400	8.41	1 600	10.53

通过表 1 和表 2 中数据的对比分析,可知 2 次回转误差结果基本相同,误差在可以忽略的数量级内,从而说明了所求实验数据的准确性。为了能够进一步看到回转误差实验数据和验证数据之间存在的线性关系,笔者以转速为横坐标,平均回转误差为纵坐标,绘制如图 12 所示的结果对比图。图中可以看出,2 组数据虽然存在差异,但是整体的趋势是一致的,进而证明了使用多步法误差分离法所分离出的回转误差是准确的。

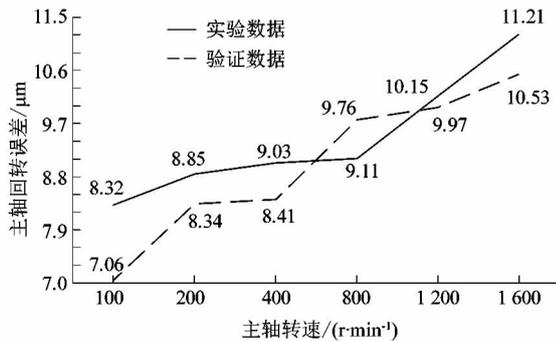


图 12 主轴回转误差结果对比

Figure 12 Comparison of spindle rotation error results

3 结论

针对如何快速有效的测量主轴的回转误差,笔者提出了使用电涡流位移传感器直接对主轴的外轮廓进行测量的方法,此方法能够避免引入标准球或标准棒的形状误差和主轴的轴向窜动对测量的影响。最终根据原始数据中误差的特性,采用多步法对原始数据进行分离,最终获得主轴回转误差。

通过具体的实验研究结果表明所提出的多步法可

以快速有效地检测主轴的回转误差。具体结论如下:

1) 通过使用位移传感器直接对主轴的外轮廓进行测量,得到原始数据后根据集合平均的原理,去除数据采集时所混入的随机误差,数据经过集合平均后会缩小波动范围。

2) 根据多步法分离上述经过集合平均后的数据,得到主轴外轮廓的形状误差。并对比 x 方向和 y 方向上所求出的主轴形状误差是否一致,结果表明 x 方向和 y 方向所求得的主轴回转误差是一样的,也证明了分离出的主轴形状误差是准确的;去除形状误差后可以得到准确的主轴回转误差。

3) 笔者通过最小二乘法实现了对主轴回转精度的评定。结果表明,主轴的回转误差波动范围越大,主轴回转精度就越低,拟合出来的圆形轮廓就越参差不齐,可以根据拟合圆的圆度来直观地看出主轴当前回转误差的情况。

4) 使用美国 Lion Precision 主轴回转误差分析仪对通过多步法所求出的回转误差数据进行验证分析,验证结果表明笔者所提出的多步法可以快速有效地测量出准确的主轴回转误差。

参考文献:

- [1] 顾伟德,周亮,万春鹏. 主轴回转误差测量技术研究现状[J]. 机械制造,2021,59(9):75-80.
- [2] LIU F, LIANG L, XUG H, et al. Four-point method in the measurement and separation of spindle rotation error [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2021,26(1):113-123.
- [3] 曹健. 关于数控机床主轴回转误差的检测方法研究[J]. 科学技术创新,2020(7):27-28.
- [4] 金岸,缪寅宵,刘冬冬,等. 主轴动态回转误差测量技术[J]. 光学工程,2020,28(10):2227-2243.
- [5] 刘思遥,黄美发,张政波. 基于多变量优化的机床主轴回转误差分离研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(7):85-87.
- [6] 景岗,张立平,张思矩,等. 高精度主轴回转精度的测试与研究[J]. 制造技术与机床,1996(6):24-26.
- [7] 黄长征,李圣怡. 超精密车床主轴回转误差运动的动态测试[J]. 航空精密制造技术,2002(4):1-3.
- [8] 李迅波. 机床主轴回转误差计算机辅助测试[J]. 电子科技大学学报,1998(2):41-45.
- [9] 彭万欢,赵午云,陶继忠,等. 超精密空气静压主轴径向回转误差的测试研究[J]. 制造技术与机床,2008(10):55-58.

(下转第 65 页)