

基于运动误差的3-D表面形貌检测方法

乔冠尧, 徐嘉忆, 赵春雨

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 主轴运动误差会降低被加工表面的质量和被加工轮廓的动态精度。通过对数控机床主轴运动误差的分析和研究,提出了一种基于运动误差的车削工件3-D表面形貌检测方法。仿真结果表明,该检测方法在求解主轴回转误差和工件表面形貌时具有很高的计算精度,可将工件表面形貌与主轴径向跳动误差和倾角摆动误差分离。为了验证该检测方法的可靠性,搭建了3-D表面形貌检测平台采集实验数据,之后通过分离算法得到了工件表面形貌数据和数控机床主轴运动误差。最后,分析了实验中异步误差和传感器误差对工件表面形貌检测结果的影响。

关键词: 主轴运动误差;表面形貌检测;误差分离;表面重构;误差分析

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)12-1726-08

3-D Surface Morphology Detection Method Based on Motion Error

QIAO Guan-yao, XU Jia-yi, ZHAO Chun-yu

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Chun-yu, E-mail: chyzhao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The spindle motion error will reduce the quality of the machined surface and the dynamic accuracy of the machined profile. A 3-D surface morphology detection method for turning workpieces based on motion error was proposed after analyzing and studying the spindle motion error of the CNC lathe. The simulation results showed that the detection method has high calculation accuracy in solving spindle rotation error and workpiece surface profile and can separate the workpiece surface profile from spindle radial runout error and tilt swing error. In order to verify the reliability of the detection method, a 3-D surface topography detection platform was built to collect experimental data, and then the workpiece surface topography data and the motion error of the CNC lathe spindle were obtained by a separation algorithm. Finally, the effect of asynchronous error and sensor error on the results of surface morphology inspection of the artifacts in the experiment were analyzed.

Key words: spindle motion error; surface morphology detection; error separation; surface reconstruction; error analysis

在精密加工和超精密加工中,主轴运动误差会降低加工表面的质量和加工轮廓的动态精度。工件在数控机床加工的过程会受到许多因素(轴平行度、定位重复性、刚度、测量系统的精度等)的影响,这些因素综合决定了被加工对象的精度和质量。

数控机床产生加工误差的因素有很多,如主

轴运动误差或外部扰动、热变形、过度的力、振动等,其中主轴运动误差是产生误差最主要的因素。工件加工过程中需要多次测量以提高其制造精度,工件从机床取下放入检测设备中测量,这一过程不仅耗时,还可能引入新的安装误差。工件在位检测可以避免安装误差,为了获取真实的工件表面数据,需要将工件表面形貌数据和机床

运动误差等从检测结果中分离^[1-3].

自 Donaldson^[4]首次采用反转法分离主轴运动误差以来,测量技术不断进步. Mitsui 等^[5]采用三点式检测方法进一步提升了机床主轴回转精度的测量水平. Noguchi 等^[6]提出了一种可以准确反映主轴位移特性的矢量示值评价方法. Lee 等^[7]提出的在机床主轴两端安装标准球的方法是一个创新,但其检测精度受限于标准球的安装误差,限制了其广泛应用. Jemielniak 等^[8]通过算法开发,提出了一种提高检测精度的主轴误差运动检测方法. Shi 等^[9]的混合三传感器检测方法,增强了对误差源的鲁棒性. Back 等^[10]通过预补偿形位误差信号,提高了多探针误差分离技术的精度. Huang 等^[11]通过建立主轴动力学模型,深入研究了主轴运动误差对工件加工精度的影响. 研究人员对主轴运动误差的分离进行了大量研究,但关于车削过程中重构工件 3-D 表面形貌的研究仍然较为有限.

本文基于主轴运动误差与工件表面形貌的几何关系,提出了一种基于运动误差的车削工件 3-D 表面形貌检测方法. 通过 MATLAB 仿真验证了检测方法可将工件的表面形貌数据与主轴运动误差数据从检测信号中分离,并且具有较高的计算精度. 在实验室现有有机床上安装了传感器,采集了主轴运行时工件处的振动位移数据,利用误差分离算法将检测数据中主轴运动误差和工件表面形貌数据分离,重构工件的 3-D 表面形貌. 最后,分析了异步误差和传感器误差对工件检测结果的影响.

1 主轴误差运动的描述

工件的圆度误差测量,轴线直线度测量等,需要工件的表面形貌数据进行评定. 传感器检测信号是主轴回转运动误差和工件表面形貌的混合数据,需将两部分数据分离后才可进行后续处理. 因此,对主轴回转运动误差要有准确的描述^[12].

如图 1 所示,主轴运动误差有 5 个自由度,它们可以描述为 3 个平动分量和 2 个摆动分量. 3 个平动分量即沿 x 轴的纯径向跳动误差 δ_x ,沿 y 轴的纯径向跳动误差 δ_y 和沿着 z 轴的纯轴向窜动误差 δ_z . 2 个摆动分量为绕着 x 轴的倾角摆动误差 ε_x 和绕着 y 轴的倾角摆动误差 ε_y .

由于主轴回转运动存在非周期性或准周期性的冗余信号,会使传感器测出的信号不具有重

复性,造成主轴回转运动误差在表述和测量时有较复杂的情况出现. 主轴回转误差运动存在主轴转速整数倍的同步误差运动和非整数倍的异步误差运动.

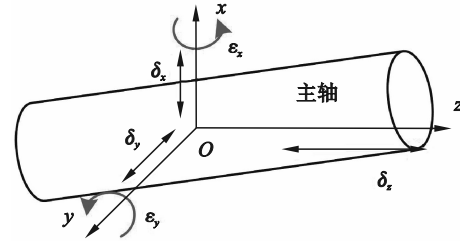


图 1 主轴的运动误差

Fig. 1 Spindle motion error

主轴的同步误差会在主轴回转运动误差测量中重复出现,数控机床主轴的同步误差主要来源于轴承与配合轴因加工制造带来的圆度误差. 而异步误差通常认为是随机的、统计性的误差,或是与主轴转速频率非整数倍的非随机源(电机、皮带等)带来的误差.

2 主轴误差分离原理

主轴运动误差检测系统传感器布置如图 2a 所示,工件通过卡盘与主轴相连, R 为工件理想半径,截面 a 中心与主轴中心的距离为 L_1 , z 轴与主轴轴线重合. 图 2b 中固定惯性坐标系为 $Oxyz$,当主轴静止时, O 为主轴的理想中心, O' 为截面 a 的回转中心. 图 2c 中 O'' 为截面 b 的回转中心. 传感器 S_1 和 S_2 , S_3 和 S_4 分别安装在相距为 L_2 的 a , b 截面内,其中,传感器 S_1 和 S_3 平行于坐标系的 x 轴,而传感器 S_2 和 S_4 平行于坐标系的 y 轴,沿 z 轴布置.

主轴转角为 φ ,截面 a 的实际轮廓为 $r_a(\varphi)$,截面 b 的实际轮廓为 $r_b(\varphi)$; 主轴径向跳动误差为 $\delta_x(\varphi)$, $\delta_y(\varphi)$,倾角摆动误差为 $\varepsilon_x(\varphi)$, $\varepsilon_y(\varphi)$. 各传感器读数可表示为截面实际轮廓在坐标轴上的投影和主轴运动误差的组合,即

$$\begin{aligned} S_1(\varphi) &= r_a(\varphi) \cdot \cos \theta_1(\varphi) + \delta_x(\varphi) + L_1 \cdot \varepsilon_y(\varphi), \\ S_2(\varphi) &= r_a\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos \theta_2(\varphi) + \delta_y(\varphi) + L_1 \cdot \varepsilon_x(\varphi), \\ S_3(\varphi) &= r_b(\varphi) \cdot \cos \theta_3(\varphi) + \delta_x(\varphi) + (L_1 + L_2) \cdot \varepsilon_y(\varphi), \\ S_4(\varphi) &= r_b\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos \theta_4(\varphi) + \delta_y(\varphi) + (L_1 + L_2) \cdot \varepsilon_x(\varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

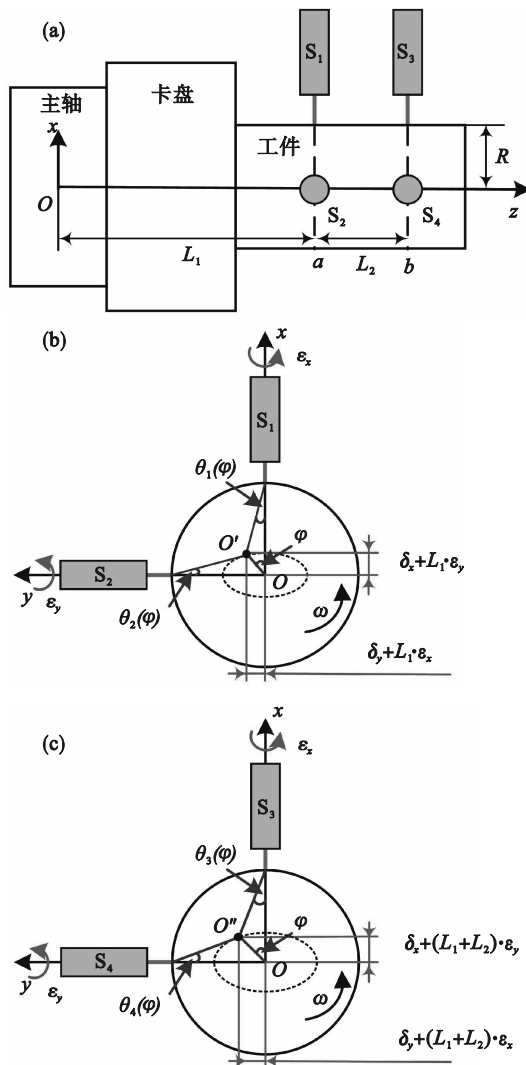


图2 检测原理

Fig. 2 Detection principle

(a)一检测原理; (b)一工件截面 a; (c)一工件截面 b.

将工件的待测面按圆周方向均匀分成 N 份, 各采样点在圆周方向的位置为 $\varphi_i, i=1, 2, 3, \dots, N$, 采样周期为主轴旋转一圈, 主轴共旋转 M 圈. 由于主轴运动误差远小于工件半径, 工件被测截面中心与主轴理想中心相距 L , 传感器读数 $S_n(\varphi_i)$ 可表示为 $S_n(\varphi_i) = r(\varphi_i) + \delta(\varphi_i) + L \cdot \varepsilon(\varphi_i), n=1, 2, 3, 4.$ (2)

主轴运动误差包括同步误差和异步误差, 当采样数据足够多时, 异步误差会减小或消除. 传感器读数在多个采样周期的平均值为

$$\bar{S}_n(\varphi_i) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_n(\varphi_i) = r(\varphi_i) + \bar{\delta}(\varphi_i) + L \cdot \bar{\varepsilon}(\varphi_i). \quad (3)$$

主轴同步误差可表示为

$$\bar{\delta}(\varphi_i) + L \cdot \bar{\varepsilon}(\varphi_i) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\delta(\varphi_i) + L \cdot \varepsilon(\varphi_i)). \quad (4)$$

传感器 S_1 和 S_3 , 传感器 S_2 和 S_4 的读数分别存在相同的误差项, 可将其合并, 即

$$\begin{cases} \bar{\delta}_x(\varphi_i) + L_1 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i) = \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i), \\ \bar{\delta}_y(\varphi_i) + L_1 \cdot \bar{\varepsilon}_x(\varphi_i) = \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i). \end{cases} \quad (5)$$

传感器第一次检测数据可表示为

$$\begin{cases} \bar{S}_1(\varphi_i) = r_a(\varphi_i) + \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i), \\ \bar{S}_2(\varphi_i) = r_a\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i), \\ \bar{S}_3(\varphi_i) = r_b(\varphi_i) + \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) + L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i), \\ \bar{S}_4(\varphi_i) = r_b\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) + L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_x(\varphi_i). \end{cases} \quad (6)$$

主轴旋转 180° , 保证工件轴向定位不变, 工件按照初始位置重新装夹, 传感器第二次检测数据可表示为

$$\begin{cases} \bar{S}_1(\varphi_i + \pi) = r_a(\varphi_i) - \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i), \\ \bar{S}_2(\varphi_i + \pi) = r_a\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) - \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i), \\ \bar{S}_3(\varphi_i + \pi) = r_b(\varphi_i) - \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) - L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i), \\ \bar{S}_4(\varphi_i + \pi) = r_b\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) - \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) - L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_x(\varphi_i). \end{cases} \quad (7)$$

将传感器 S_1 和 S_3 的两次检测数据写成方程组的形式, 即

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_1(\varphi_i) \\ \bar{S}_3(\varphi_i) \\ \bar{S}_1(\varphi_i + \pi) \\ \bar{S}_3(\varphi_i + \pi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a(\varphi_i) + \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) \\ r_b(\varphi_i) + \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) + L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i) \\ r_a(\varphi_i) - \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) \\ r_b(\varphi_i) - \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) - L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

化简式(8)可得

$$\begin{bmatrix} r_a(\varphi_i) \\ r_b(\varphi_i) \\ \bar{\delta}_{xx}(\varphi_i) \\ L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_y(\varphi_i) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1^{-1} \begin{bmatrix} \bar{S}_1(\varphi_i) \\ \bar{S}_3(\varphi_i) \\ \bar{S}_1(\varphi_i + \pi) \\ \bar{S}_3(\varphi_i + \pi) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中 \mathbf{A}_1 为系数矩阵. 求解该方程组可得到工件轮廓 $r_a(\varphi_i), r_b(\varphi_i)$ 和 x 方向的主轴同步误差 $\bar{\delta}_{xx}(\varphi_i)$ 与 y 轴摆动角误差 $\bar{\varepsilon}_y(\varphi_i)$.

同理, 传感器 S_2 和 S_4 的两次检测数据可写为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_2(\varphi_i) \\ \bar{S}_4(\varphi_i) \\ \bar{S}_2(\varphi_i + \pi) \\ \bar{S}_4(\varphi_i + \pi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) \\ r_b\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) + L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_x(\varphi_i) \\ r_a\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) - \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) \\ r_b\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) - \bar{\delta}_{yy}(\varphi_i) - L_2 \cdot \bar{\varepsilon}_x(\varphi_i) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

化简式(10)可得

$$\begin{bmatrix} r_a(\varphi_i) \\ r_b(\varphi_i) \\ \overline{\delta_{yy}}(\varphi_i) \\ L_2 \cdot \overline{\varepsilon_x}(\varphi_i) \end{bmatrix} = A_2^{-1} \begin{bmatrix} \overline{S}_2(\varphi_i) \\ \overline{S}_4(\varphi_i) \\ \overline{S}_2(\varphi_i + \pi) \\ \overline{S}_4(\varphi_i + \pi) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 A_2 为系数矩阵. 求解方程组可得工件轮廓 $r_a(\varphi_i), r_b(\varphi_i)$ 和 y 方向的主轴同步误差 $\overline{\delta_{yy}}(\varphi_i)$ 与 x 轴摆动角误差 $\overline{\varepsilon_x}(\varphi_i)$.

最后, 主轴径向跳动误差可求解如下:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\delta_x}(\varphi_i) &= \overline{\delta_{xx}}(\varphi_i) - L_1 \cdot \overline{\varepsilon_y}(\varphi_i), \\ \overline{\delta_y}(\varphi_i) &= \overline{\delta_{yy}}(\varphi_i) - L_1 \cdot \overline{\varepsilon_x}(\varphi_i). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3 测试原理仿真结果分析

设定传感器 S_1, S_3 安装间距与传感器 S_2, S_4 安装间距同为 30 mm, 传感器安装位置与检测原理图相同, 传感器 S_1, S_3 与基准面的距离设置为 100 mm. 如图 3 所示, 在一个周期内取 2 560 个采样点, 分别构造两个截面的表面形貌与主轴同步运动误差, 其中主轴同步运动误差分为径向跳动误差和倾角摆动误差.

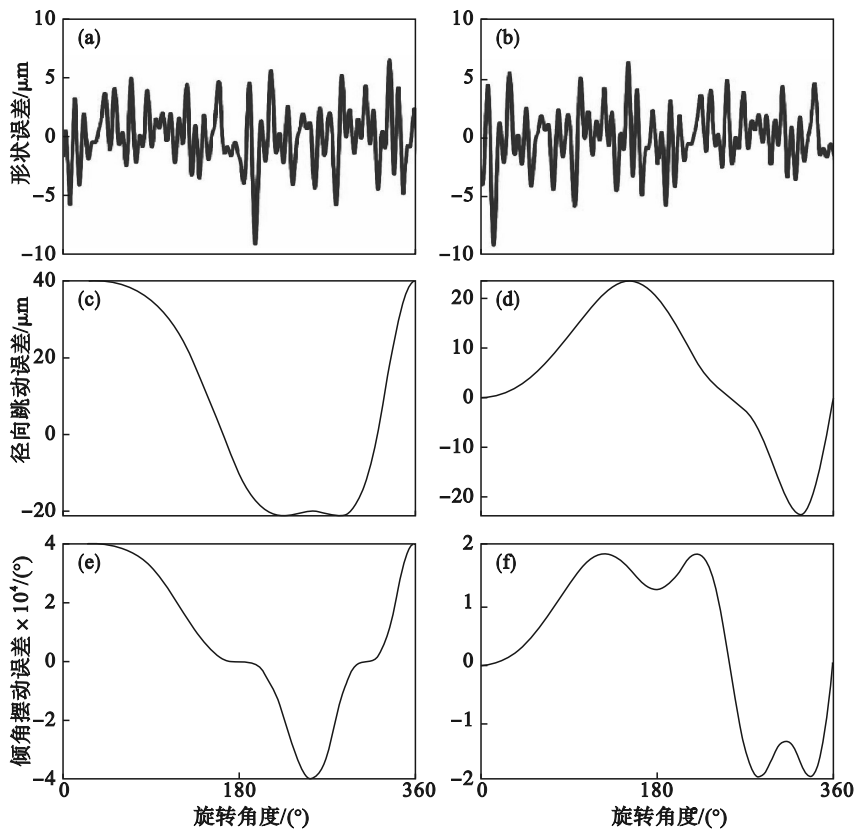


图 3 算法处理前的数据

Fig. 3 Data before the algorithm processing

(a)一截面 1 的表面形貌; (b)一截面 2 的表面形貌; (c)一沿 x 方向跳动误差; (d)一沿 y 方向跳动误差; (e)一绕 x 轴的摆动误差; (f)一绕 y 轴的摆动误差.

传感器读数由工件表面形貌与机床主轴运动误差两部分组合, 算法验证时将主轴运动误差与工件表面形貌组合为传感器的理论读数. 如图 4 所示, 主轴旋转前一个周期内传感器仿真读数为 $S_1(\varphi), S_2(\varphi), S_3(\varphi)$ 和 $S_4(\varphi)$, 主轴旋转后一个周期内的仿真读数为 $S_1(\varphi + \pi), S_2(\varphi + \pi), S_3(\varphi + \pi)$ 和 $S_4(\varphi + \pi)$.

4 个传感器在多个周期下的仿真读数经分离算法处理后的数据如图 5 所示, 可明显观察到算法处理后的截面表面形貌数据和主轴运动误差数据与处理前基本一致.

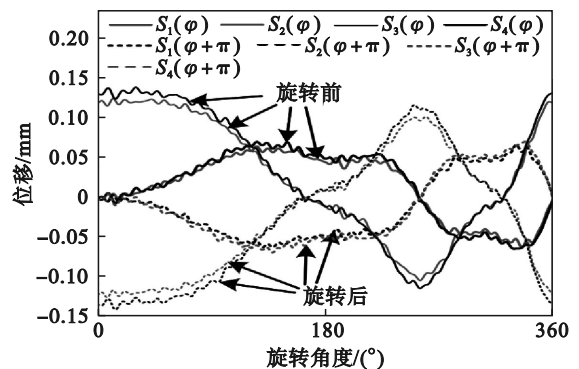


图 4 传感器的理论读数

Fig. 4 Theoretical reading of the sensor

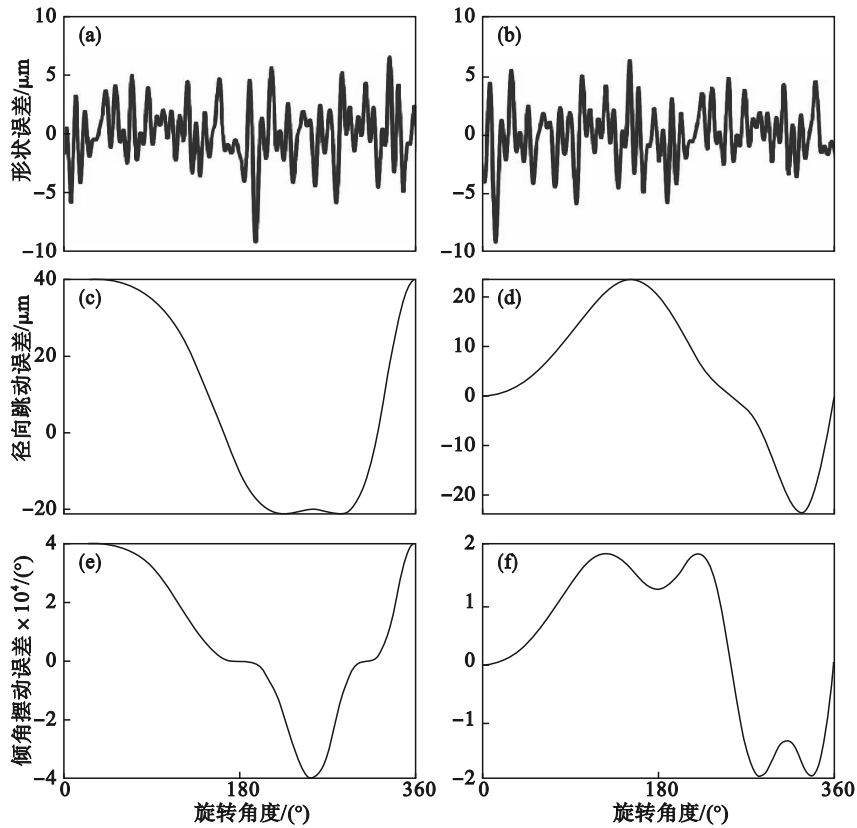


图5 算法处理后的数据

Fig. 5 Data after the algorithm processing

- (a)—截面1的表面形貌; (b)—截面2的表面形貌; (c)—沿x方向跳动误差;
- (d)—沿y方向跳动误差; (e)—绕x轴的摆动误差; (f)—绕y轴的摆动误差.

算法处理前后的表面形貌数据对比如图6所示,计算前后结果基本一致.算法处理前后传感器仿真读数的误差可以用均方误差(MSE)评定,其结果越小越好,计算公式为

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2. \quad (13)$$

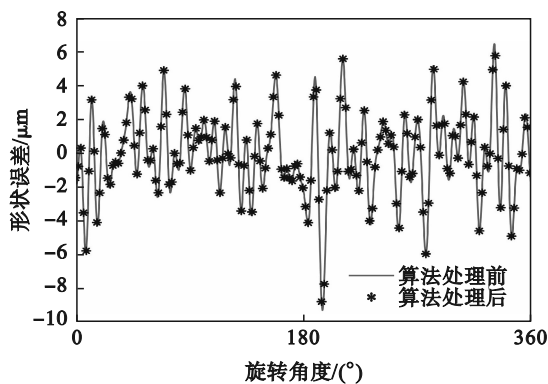


图6 算法处理前后的数据对比

Fig. 6 Data comparison before and after the algorithm processing

平均绝对误差(MAE)的计算公式为

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}|. \quad (14)$$

计算结果的均方误差为 $9.220 2 \times 10^{-19}$, 绝对误差为 $7.217 7 \times 10^{-19}$, 误差在允许的范围, 符合要求. 这表明算法在分离主轴同步误差与工件截面形貌数据时计算精度较高.

主轴异步误差运动可由 Weierstrass-Mandelbrot (简称 W-M) 函数生成. 该函数绘制的曲线处处连续但不可导, 符合异步误差的特性, 其表达式为

$$z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}}, \quad (1 < D < 2, \gamma > 1). \quad (15)$$

式中: $z(x)$ 为随机曲线轮廓高度; D 为分形维数; G 为特征尺度参数, $G = 1 \times 10^{-4}$; γ 为大于 1 的常数, $\gamma = 1.5$; n 为轮廓曲线微凸体的频率指数, n_1 满足 $\gamma^{n_1} = 1/L$ (L 为取样长度).

工件截面轮廓的算术平均偏差 R_a 为 $1.85 \mu\text{m}$, 异步误差的算术平均偏差 R_a 为 $1.53 \mu\text{m}$. 主轴异步误差运动对工件截面 R_a 的影响如图7所示. 随着测试周期数 M 的增加, 带有异步误差时工件截面的 R_a 值逐渐接近没有异步误差时工件截面的理论值.

仿真结果表明, 该算法在处理传感器检测数据时, 具有较高的计算精度. 工件截面的表面形

貌数据基本不受主轴同步运动误差的影响,同时,增加测试数据的周期数可以中和异步误差,降低异步误差对分离结果的影响.

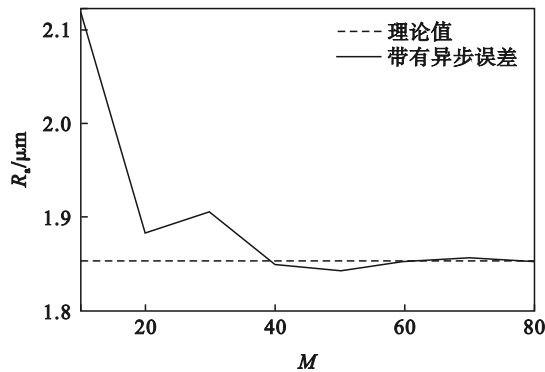


图 7 异步误差的影响

Fig. 7 Effect of the asynchronous error

4 实验研究

基于实验室现有的数控车床 CNC6130, 搭建了由 4 个电涡流位移传感器 (ML-02-00-03) 组成的检测系统, 验证本文提出的主轴运动误差与表面形貌分离算法. 在工件的水平方向与铅垂方向各布置两个位移传感器, 传感器在轴向的间距相同, 4 个传感器同时检测工件两个截面的位移信号, 工件端面上标记检测的初始相位, 搭建的测试系统如图 8 所示.

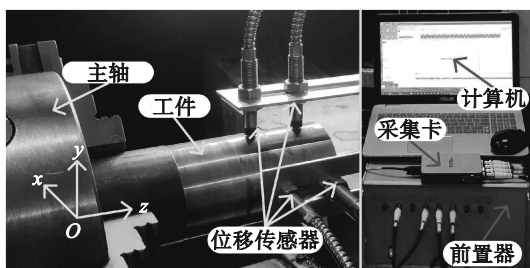


图 8 测试系统

Fig. 8 Test system

实验时, 传感器距基准面 200 mm, 相邻传感器在轴向上相距 30 mm, 两组空间正交的传感器分别检测水平位移信号与铅垂方向位移信号. 数控机床主轴的转速设定为 500 r/min, 工作台每 10 s 在轴向移动 1 mm, 主轴停止转动后移动工作台, 测得多组数据. 如图 9a 所示, 图中 4 条曲线为 4 个位移传感器在工件处于初始相位时检测主轴旋转一周时得到的位移信号. 初始相位信号检测完成后, 主轴旋转 180°, 工件与传感器位置保持不变. 旋转后工件的位移信号如图 9b 所示.

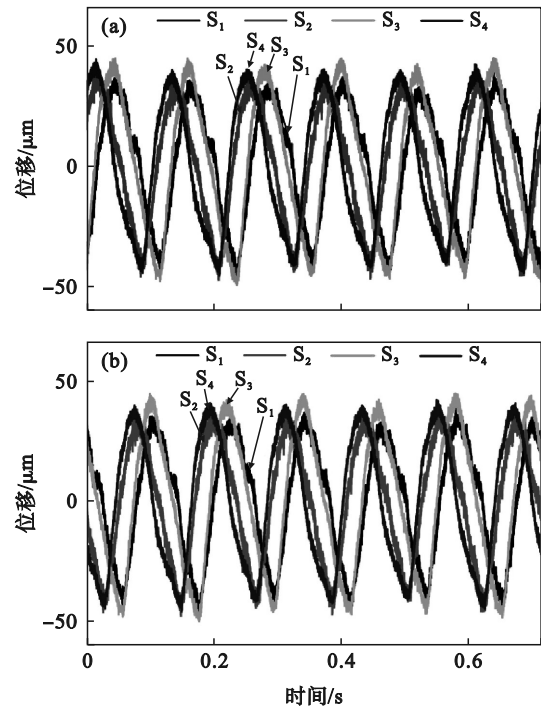


图 9 不同传感器测量的位移信号

Fig. 9 Displacement signals measured by different sensors

(a)—旋转前; (b)—旋转后.

位移传感器采集的数据需要预处理才可以使用, 首先需对实验数据进行滤波处理, 低通滤波器的截止频率设置为 500 Hz. 滤波完成后, 去除主轴工作稳定前和主轴停止转动前的数据, 避免主轴工作不稳定对数据处理造成影响. 基于检测数据特征和相位标志, 将检测数据按旋转周期进行分组, 然后对相同相位处的数据求取均值, 中和主轴的异步误差. 此时, 传感器读数只剩主轴的同步误差和工件截面的表面形貌.

旋转前后的检测数据经本文算法处理后, 可求得工件表面形貌和主轴运动误差. 前两个工件检测截面的表面形貌如图 10 所示. 两个检测截面的形貌具有一致性, 工件截面 1 和截面 2 的轮廓算术平均偏差 R_a 分别为 4.28 和 5.44 μm .

主轴沿 x, y 轴的径向跳动误差和绕 x, y 轴的倾角摆动误差如图 11 所示. 主轴的运动误差会对工件的圆度误差、圆柱度误差和同轴度误差造成影响. 由于主轴摆动误差的存在, 同时主轴摆动误差峰值与径向跳动误差峰值存在一定的相位差, 主轴径向跳动误差幅值超过传感器测得的振动位移幅值. 尽管这一现象减小了工件检测截面处的主轴同步误差幅值, 但随着加工截面远离基准面, 主轴摆动误差对长轴类工件形状误差的影响会越来越大.

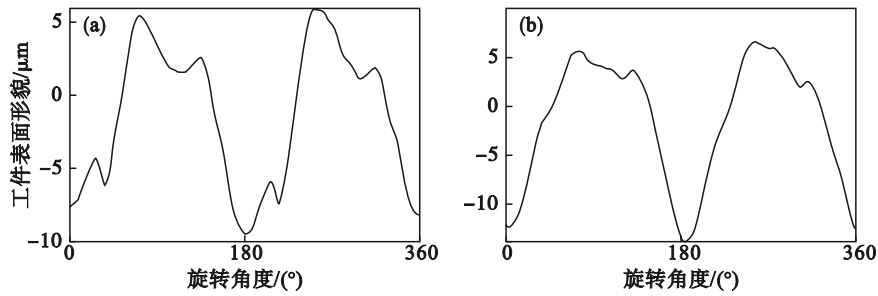


图 10 工件的表面形貌

Fig. 10 Surface topography of the workpiece

(a)—截面 1; (b)—截面 2.

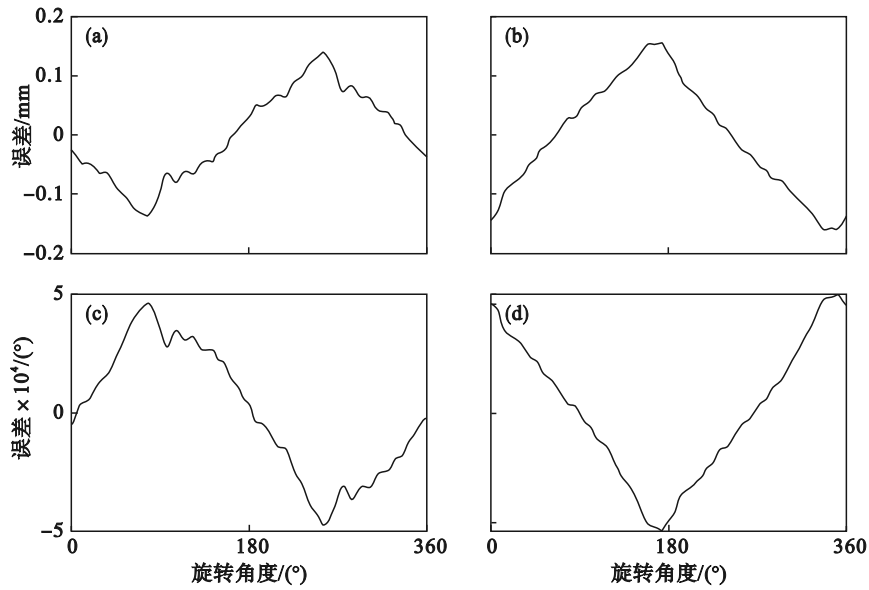


图 11 主轴运动误差

Fig. 11 Spindle motion error

(a)—沿 x 方向跳动误差; (b)—沿 y 方向跳动误差; (c)—绕 x 轴摆动误差; (d)—绕 y 轴摆动误差.

传感器沿轴向检测工件多个截面的数据,经所提算法处理可从数据中分离出各个检测截面的表面形貌数据.工件平均半径为 30 mm,按照工件被检测截面的轴向位置,重构的工件 3-D 表面形貌如图 12 所示.

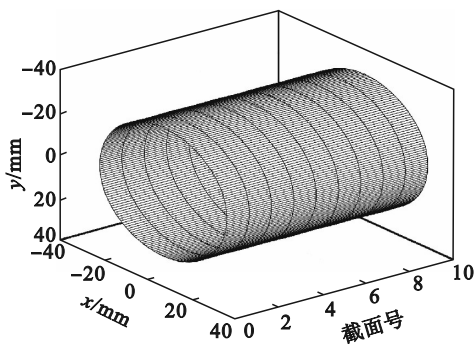


图 12 工件 3-D 表面

Fig. 12 3-D surface of the workpiece

5 误差分析

实验时,检测数据受到传感器自身高频随机误差的影响.数据预处理时,需要对检测数据进行滤波,过滤掉传感器带来的高频随机误差.去除传感器高频随机误差前后的实验结果如图 13 所示.带有随机误差时,工件截面 1 和 2 的轮廓算术平均偏差 R_a 分别为 3.76 和 4.77 μm ,带有随机误差的计算结果小于去除随机误差后的计算结果.

数据采集过程中,主轴运动误差中的异步误差一直存在.随着主轴旋转圈数 M 的增加,即周期个数增加,异步误差会逐渐减小.异步误差对同一截面 R_a 的影响如表 1 所示.以 $M=120$ 时辨识结果为计算基准,随着 M 的增加,计算结果逐渐趋于稳定.

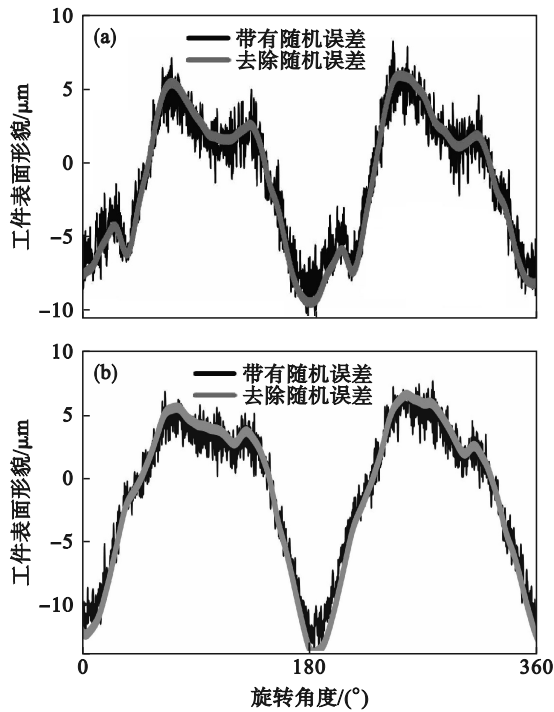


图 13 随机误差对截面形貌的影响

Fig. 13 Effect of random error on the surface topography

(a)一截面 1; (b)一截面 2.

表 1 M 对计算结果的影响

截面	M=60	M=80	M=100	M=120
1	4.281 1	4.281 3	4.281 3	4.281 4
2	5.441 9	5.442 3	5.442 4	5.442 4

主轴运动误差检测过程中,传感器与坐标轴不平行,此时,传感器的检测数据会引入安装角误差.设传感器 S_1 与 x 轴的夹角为 Δ ,安装角误差对工件截面 R_a 的影响如表 2 所示.主轴以 500 r/min 运行时,安装角误差增加会使工件截面轮廓算术平均偏差的计算结果增加,但影响较小,实验时应保证传感器与坐标轴平行.

表 2 Δ 对计算结果的影响

截面	$\Delta=0^\circ$	$\Delta=0.5^\circ$	$\Delta=1^\circ$
1	4.281 4	4.281 5	4.281 9
2	5.442 4	5.442 4	5.442 5

6 结 语

本文提出了一种基于数控车床主轴运动误差的车削工件 3-D 表面形貌检测方法,建立了由 4 个传感器组成的检测系统.仿真结果表明,该检测方法在使用几何关系求解主轴运动误差和工件表面形貌具有很高的计算精度,还可将主轴

径向跳动误差和倾角摆动误差分离.在实验室现有机床上搭建检测系统并采集数据,并将实验数据代入本文算法,得到了工件的表面形貌数据和机床主轴的运动误差,按照检测截面的位置重构了工件的 3-D 表面形貌.误差分析结果表明,传感器自身的高频随机误差会使 R_a 减小,实验数据预处理时需要滤波;通过增加主轴旋转圈数,可以中和异步误差,降低异步误差对 R_a 的影响;传感器安装角误差的增加会使 R_a 增大,但主轴以 500 r/min 运行时,安装角误差对计算结果的影响较小,实验时应保证传感器与坐标轴平行.

参考文献:

[1] Ge Z T, Gao W, Kiyono S. Basic study on measurement of 2-D surface profile: 2nd report: measurement error analysis [J]. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 1997, 40 (3): 439-446.

[2] Kiyono S, Gao W. On-machine measurement of large mirror profile by mixed method [J]. *JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, 1994, 37(2): 300-306.

[3] Horikawa O, Maruyama N, Shimada M. A low cost, high accuracy roundness measuring system [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25(3): 200-205.

[4] Donaldson R R. A simple method for separating spindle error from test ball roundness error [J]. *CIRP Annals*, 1972, 21(1): 125-126.

[5] Mitsui K, Kakishima M, Yoshida Y. Development of a new measuring method for spindle rotation accuracy by three points method [J]. *Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, 1983, 35(1): 11-21.

[6] Noguchi S, Tsukada T, Sakamoto A. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units [J]. *Precision Engineering*, 1995, 17(4): 266-273.

[7] Lee E S, Wih G. A comprehensive technique for measuring the three-dimensional positioning accuracy of a rotating object [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, 14(5): 330-335.

[8] Jemielniak K, Chrzanowski J. Spindle error movements measurement algorithm and a new method of results analysis [J]. *Journal of Machine Engineering*, 2015, 15(1): 25-35.

[9] Shi S Y, Lin J, Wang X F, et al. A hybrid three-probe method for measuring the roundness error and the spindle error [J]. *Precision Engineering*, 2016, 45(1): 403-413.

[10] Baek S W, Hwang I O, Cho N G. Measurement of five-degrees-of-freedom spindle error motion using multi-probe error separation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(9): 1373-1383.

[11] Huang P, Lee W B, Chan C Y. Investigation of the effects of spindle unbalance induced error motion on machining accuracy in ultra-precision diamond turning [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94: 48-56.

[12] 孙方金, 陈世杰. 精密轴系回转精度测试 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.

(Sun Fang-jin, Chen Shi-jie. Precision shafting rotation accuracy test [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.)