

文章编号 1004-924X(2001)04-0319-05

基于主轴回转运动误差在线检测的二次相移三点法

李自军,洪迈生,魏元雷,苏恒
(上海交通大学机械工程学院,上海 200030)

摘要:提出了一种基于数据重组和反滤波的二次相移三点法圆度误差分离技术,可以先行分离出主轴的回转运动误差,从而能够实现运动误差的在线检测。通过对三个传感器的测量数据按照二次相移原则进行数据重组,可以在数据处理的首次操作时消除圆度形状误差的影响,从而在二次操作时先行得到运动误差。权函数的对比分析表明该方法与圆度三点法在本质上的同源性和统一性。仿真与实验结果均表明:该方法可以先后分离出运动误差和形状误差,具有良好的分离效果。

关键词:二次相移三点法;误差分离技术;反滤波;回转运动误差

中图分类号:TH161.5 **文献标识码:**A

1 引言

常见的圆度误差分离技术,如圆度三点法^[1]、混合三点法^[2]、时域三点法^[3]等,一般都是先行分离出形状误差,再据此求得运动误差,也就是说运动误差是间接得到的,由于分离操作中不可避免的误差残留,使得到的运动误差与实际值不相符;另外,在机床和精密机械的精度或故障诊断以及在线检测和补偿中,有时仅需测试轴系或工作台的运动误差,而不需要对基准工件的形状误差作直接研究。在以上情况下,通常还是希望能够根据传感器测量数据直接得到运动误差^[4,5]。本文以圆度误差分离技术为例,提出了一种能够先行分离出运动误差的一般化方法——二次相移三点法。

2 测量系统和原始方程

测量系统如图1所示,与常规的圆度三点法^[1]完全一样,各测头读数以离散形式也同样可表示为:

$$z_i(n) = h(n + p_i) + \delta_x(n)\cos(p_i\Delta\theta) + \delta_y(n)\sin(p_i\Delta\theta) \quad (1)$$

式中, $i = 0, 1, 2; n = 0, 1, 2, \dots, N - 1; \Delta\theta = 2\pi/N; N$ 为每周数据采样点数; $\varphi_i = p_i\Delta\theta$ 分别为三测头与 x 轴的夹角; $z_i(n)$ 分别为三测头的比例读数值; $h(n + p_i)$ 分别为被测工件在不同方位

φ_i 上的圆度形状误差; $\delta_x(n), \delta_y(n)$ 分别为各瞬时回转运动误差在 x 和在 y 方向上的分量。

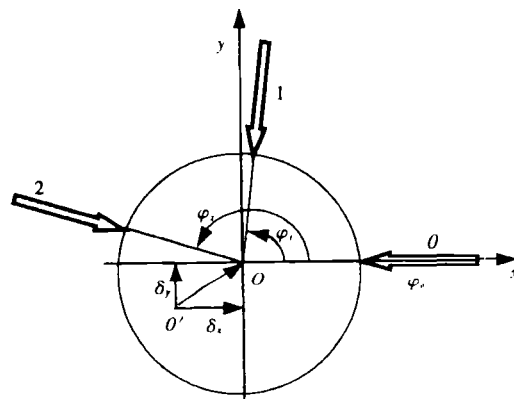


Fig.1 Measuring system

二次相移三点法操作原理如下:在三测头测量数据 $z_i(n) (i = 0, 1, 2)$ 的基础上,考虑到圆度误差测量的周期性,将 $z_i(n)$ 分别按二次相移原则进行数据二次重组,即利用 φ_i 位置传感器的测量数据 $z_i(n)$ 来重组另外两个传感器位置的值 $z_i(n + p_k), k = 0, 1, 2, \text{且 } k \neq i$, 从而得到经过相移处理的测量方程。例如:利用 $\varphi_0 = p_0\Delta\theta$ 位置的测头数据 $z_0(n)$, 通过二次数据重组可以得到 $\varphi_1 = p_1\Delta\theta, \varphi_2 = p_2\Delta\theta$ 的值 $z_0(n + p_1), z_0(n + p_2)$, 同理有 $z_1(n + p_0), z_1(n + p_2)$ 和 $z_2(n + p_0), z_2(n + p_1)$ 。有原始方程

$$\begin{bmatrix} z_1(n+p_0) \\ z_0(n+p_1) \\ z_0(n+p_2) \\ z_2(n+p_0) \\ z_2(n+p_1) \\ z_1(n+p_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n+p_0+p_1) \\ h(n+p_0+p_2) \\ h(n+p_1+p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x(n+p_0) \\ \delta_x(n+p_1) \\ \delta_x(n+p_2) \\ \delta_x(n+p_2) \\ \delta_y(n+p_0) \\ \delta_y(n+p_1) \\ \delta_y(n+p_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

分别将(2)式中的列向量和矩阵顺次记作 Z_δ 、 A_δ 、 H_δ 、 B_δ 、 Δ_δ ，则有

$$Z_\delta = A_\delta H_\delta + B_\delta \Delta_\delta \quad (3)$$

式中： Z_δ 为经过相移处理后的测量值，即读数列向量； H_δ 、 A_δ 分别为形状误差列向量及形状误差映射矩阵； B_δ 、 Δ_δ 分别是运动误差列向量及运动误差映射矩阵；

3 分离操作

设定权值系数行向量 $D = [d_0 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5]$ ，左乘方程(3)两端，有

$$DZ_\delta = DA_\delta H_\delta + DB_\delta \Delta_\delta \quad (4)$$

实施先行分离掉形状误差 $h(n)$ 的“首次操作”，是先通过合理选择行向量 $D = [e^{-jp_2\Delta\theta} \ e^{-jp_1\Delta\theta} \ e^{-jp_1\Delta\theta} \ e^{-jp_0\Delta\theta} \ e^{-jp_0\Delta\theta} \ e^{-jp_0\Delta\theta}]$ ，并令 $DA_\delta H_\delta = 0$ ，从而有 $DZ_\delta = DB_\delta \Delta_\delta$ ，

$$\begin{aligned} \text{即 } z_\delta(n) &= \sum_{i=0}^5 z_{\delta i}(n) = \\ & d_0 z_1(n+p_0) + d_1 z_0(n+p_1) + d_2 z_0(n+p_2) + \\ & d_3 z_2(n+p_0) + d_4 z_2(n+p_1) + d_5 z_1(n+p_2) = \\ & [d_0 \cos(p_1 \Delta\theta) + d_3 \cos(p_2 \Delta\theta)] \delta_x(n+p_0) + \\ & [d_1 \cos(p_0 \Delta\theta) + d_4 \cos(p_2 \Delta\theta)] \delta_x(n+p_1) + \\ & [d_2 \cos(p_0 \Delta\theta) + d_5 \cos(p_1 \Delta\theta)] \delta_x(n+p_2) + \\ & [d_0 \sin(p_1 \Delta\theta) + d_3 \sin(p_2 \Delta\theta)] \delta_y(n+p_0) + \\ & [d_1 \sin(p_0 \Delta\theta) + d_4 \sin(p_2 \Delta\theta)] \delta_y(n+p_1) + \\ & [d_2 \sin(p_0 \Delta\theta) + d_5 \sin(p_1 \Delta\theta)] \delta_y(n+p_2) \\ & = \sum_{i=0}^2 c_i \delta_y(n+p_i) + j \sum_{i=0}^2 c_i \delta_x(n+p_i) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $c = [c_0 \ c_1 \ c_2] = [\sin[(p_1 - p_2)\Delta\theta] \ \sin[(p_2 - p_0)\Delta\theta] \ \sin[(p_0 - p_1)\Delta\theta]]$ ，也就是说在 $z_\delta(n)$ 中，不再含有与工件形状误差相关的量。

所谓误差分离的“二次操作”，是把式(5)中所含的运动误差量 $\delta_x(n+p_i)$ 和 $\delta_y(n+p_i)$ 再次实行分离，其步骤如下：分别记 $z_\delta(n)$ 的实部和虚部为 $z_{\delta x}(n)$ 和 $z_{\delta y}(n)$ ，即 $z_\delta(n) = z_{\delta y}(n) + jz_{\delta x}(n)$ ，则

$$z_{\delta x}(n) = \sum_{i=0}^2 c_i \delta_x(n+p_i) \quad (6)$$

$$z_{\delta y}(n) = \sum_{i=0}^2 c_i \delta_y(n+p_i) \quad (7)$$

再记 $Z_{\delta x}(k)$ 、 $Z_{\delta y}(k)$ 、 $\Delta_x(k)$ 、 $\Delta_y(k)$ 分别为 $z_{\delta x}(n)$ 、 $z_{\delta y}(n)$ 、 $\delta_x(n)$ 、 $\delta_y(n)$ 的离散 Fourier 变换，对(6)、(7)二式分别进行离散 Fourier 变换，有 $Z_{\delta x}(k) = \delta_x(k) G_{\delta x}(k)$ ， $Z_{\delta y}(k) = \delta_y(k) G_{\delta y}(k)$ ，因此

$$\Delta_x(k) = Z_{\delta x}(k) / G(k) \quad (8)$$

$$\Delta_y(k) = Z_{\delta y}(k) / G(k) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{其中，权函数 } G(k) &= G_{\delta x}(k) = G_{\delta y}(k) = \sum_{i=0}^2 c_i W^{kp_i} \\ &= c_0 W^{kp_0} + c_1 W^{kp_1} + c_2 W^{kp_2} \\ &= [c_0 \ c_1 \ c_2] [W^{kp_0} \ W^{kp_1} \ W^{kp_2}]^T = C\Omega \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $W = e^{j2\pi/N} = e^{j\Delta\theta}$, $\Omega = [W^{p_0} \ W^{p_1} \ W^{p_2}]^T$ 为取决于系统参数结构的“相移旋转因子”。

对(8)、(9)分别进行基于逆 Fourier 变换的反滤波处理,即可先后分离得到径向运动误差的 x 分量 $\Delta_x(k)$ 和 y 分量 $\Delta_y(k)$,从而可求出其“时域”表达,即待求的运动误差为

$$\delta_x(n) = F^{-1}[\Delta_x(k)] \quad (11)$$

$$\delta_y(n) = F^{-1}[\Delta_y(k)] \quad (12)$$

把二者代入(1),又可得到形状误差为

$$h(n) = z_0(n - p_0) - \delta_x(n - p_0)\cos(p_0\Delta\theta) - \delta_y(n - p_0)\sin(p_0\Delta\theta) \quad (13)$$

由以上分析过程可知,在分离过程中引入的实部和虚部分别对应着径向运动误差的两个分量的求取方程(6)、(7),二方程在形式上与圆度三点法中先分离出形状误差的方程类似^[1],考察其权值函数(10),又不难发现,该权函数与同一系统下先行分离形状误差的一般圆度三点法的权函数完全相同,这表明了二次相移三点法与圆度三点法在本质上的同源性和统一性。

4 仿真和实验

为验证先行分离出径向运动误差 x 分量 $\delta_x(n)$ 和 y 分量 $\delta_y(n)$ 的二次相移三点法,进行了计算机仿真。仿真时首先假设径向运动误差的 $\delta_x(n)$ 和 $\delta_y(n)$ 和圆度形状误差 $h(n)$ 分别呈正弦和余弦状。采样点数 $N = 128$,三测头沿圆周方向的间距分别为 $p_0 = 0, p_1 = 32, p_2 = 63$ 。其权函数图像如图(2)所示,所得的 $\delta_x(n), \delta_y(n), h(n)$ 仿真结果依次如图(3)中(a)、(b)、(c)所示。图中,实线和虚线分别表示按照二次相移三点法分离计算后的结果和给定的曲线。可以看出,分离结果和给定值可以很好的拟合。

实验是在 MG1432B 高精度磨床上进行的,所测的是随工作台往复运动的直径为 65mm,长度

为 600mm 的圆柱形标准芯棒的外圆轮廓,每周采样点数 $N = 128$ 。测量时采用非接触式电容位移传感器,分辨率为 $0.025\mu\text{m}$,测量精度可达 $0.1\mu\text{m}$,三个传感器固定在床身上的测量架上,沿圆周方向的安装间隔分别为 $p_0 = 0, p_1 = 32, p_2 = 63$,实验结果如图(4)中(a)、(b)、(c)所示。可以看出,主轴径向运动误差的两个分量都不超过 $0.5\mu\text{m}$,具有良好的分离精度。图中,实线和虚线分别表示先行分离出径向运动误差的二次相移三点法和先行分离出圆度形状误差的圆度三点法的分离结果。

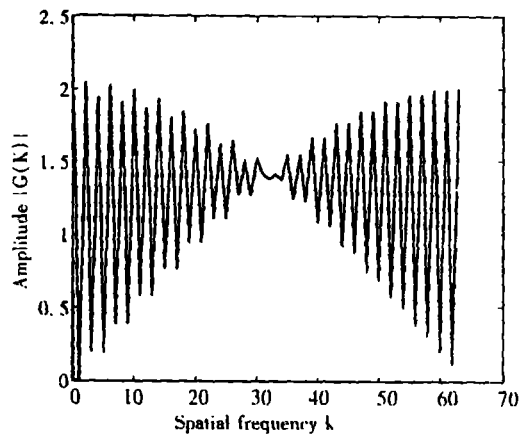
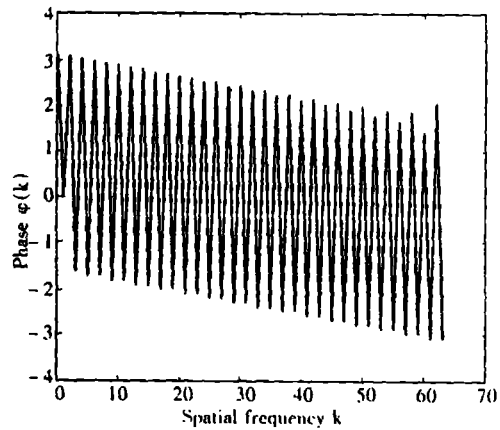
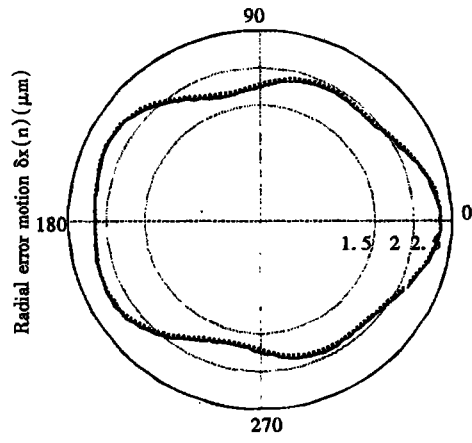
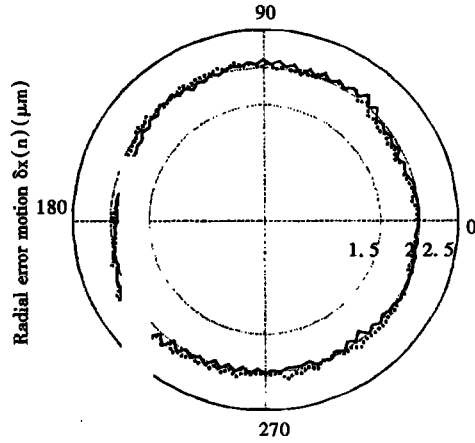


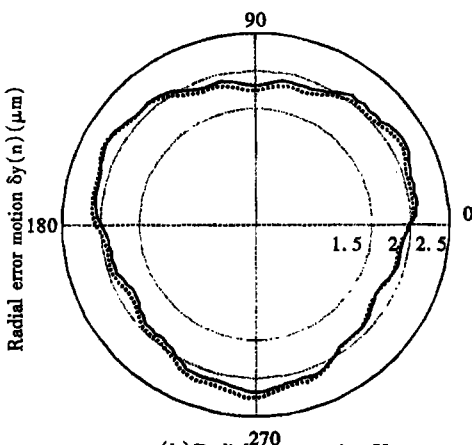
Fig. 2 Weighting function



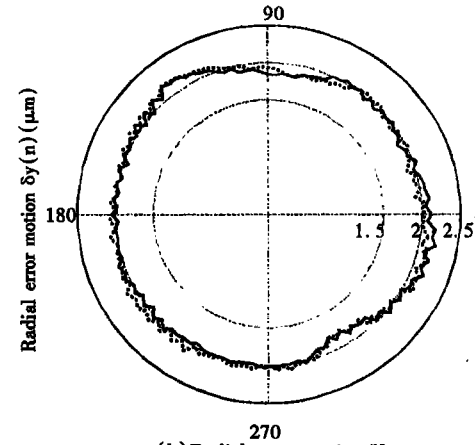
(a) Radial error motion X



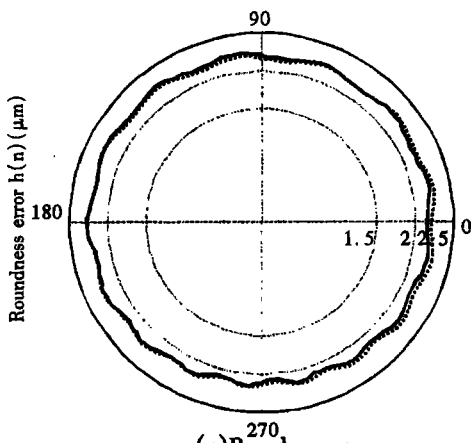
(a) Radial error motion X



(b) Radial error motion Y



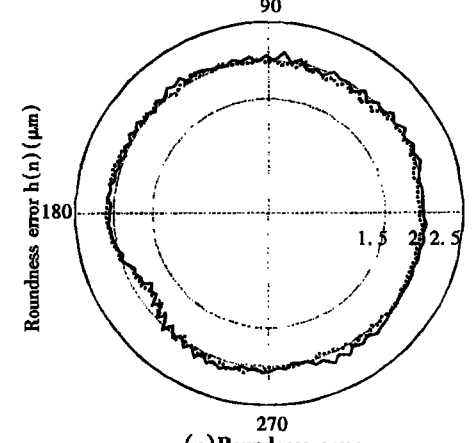
(b) Radial error motion Y



(c) Roundness error

Fig.3 Simulation results

— Separation curve
... Given curve



(c) Roundness error

Fig.4 Experimental results

— Proposed method
... Common method

5 结 论

(1)理论分析、仿真和实证结果均表明:基于数据重组和反滤波的二次相移三点法,是实施先行分离出主轴回转运动误差的一般化方法,具有

良好的分离精度,能够实现主轴运动误差的在线检测。

(2)二次相移三点法的权函数与先行分离圆度形状误差的常规圆度三点法完全相同,二者在本质上具有同源性和统一性。

参考文献:

- [1] 青木保雄,大园成夫.3点法真圆度测定法の展开[J].精密机械,1966,32(12):27-32.
- [2] Gao W, Kiyono S. On-machine profile measurement of machined surface using the combined three-point method[J]. JSME Int. J C, 1997, (40):253-259.
- [3] 洪迈生,邓宗煌,陈健强,大园成夫.精确的时域三点法圆度误差分离技术[J].上海交通大学学报,2000,34(10):1317-1319.
- [4] OKUYAMA EiKi. The roundness measurement and the radial motion measurement based on the 3-point method using the inverse filtering. (In Process Control and Inspection for Industry)[J]. SPIE, Beijing, 2000:427-431.
- [5] 洪迈生,邓宗煌.三点法误差分离技术中的两个基本问题[J].计量技术,1994,268(3):5-7.

Quadratic phase shift three-point method for on-line measurement of spindle radial motion error

LI Zi-jun, HONG Mai-sheng, WEI Yuan-lei, SU Heng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A novel technique for quadratic phase shift three-point method based on data reconstruction and inverse filtering is proposed in this paper, through which the spindle radial motion error can be separated and gained firstly, and the on-line measurement of motion error can be implemented successfully. According to the principle of quadratic phase shift, data from the three probes can be reconstructed, the influence of roundness form error can be eliminated in the process of the first operation, and the radial error motion will be acquired in the second operation. Based on the comparative analysis of weighting function, the homology and unitarity can be proved by the proposed method for motion error measurement and the common three-point method for roundness measurement. Satisfactory results have been gained in some experiments and simulations.

Key words: quadratic phase shift three-point method; error separation techniques (EST); inverse filtering; radial motion error

作者简介:李自军(1976-),男,河南省平顶山人,1999年3月毕业于吉林大学机械工程学院并获工学硕士学位,现为上海交通大学机械工程学院博士研究生,主要研究方向为机电测试与诊断、虚拟量仪与虚拟测量方向。

洪迈生(1938-),男,上海市人,上海交通大学机械工程学院教授、博士生导师,政府特殊津贴专家。主要研究方向为:虚拟量仪与虚拟测量,工艺系统的误差分离与补偿技术,在线精密检测与质量控制,计算机辅助测试,工况检测与故障诊断等。曾先后获省市部以上科技进步奖、重点攻关奖16项。