

# 圆度测量的误差分离及数据处理

崔绍良<sup>1)</sup> 钟家桢<sup>2)</sup> 孙荣平<sup>1)</sup> 宋涛<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

2) 北京科技大学自动化信息学院

**摘要** 详细推导出三测头误差分离原理用于测量工件圆度误差的数学公式; 论述用滑动平均法和数字滤波法对采样数据作处理, 可有效地抑制干扰信号, 提高信噪比; 通过对比实验证明上述方法对提高测量精度有明显效果。

**关键词** 圆度测量, 数据处理/误差分离

**中图分类号** TG806 .TP274.2、

## Error Separation Technique and Data Processing in the Roundness Measuring

Cui Shaoliang<sup>1)</sup> Zhong Jiazheng<sup>2)</sup> Sun Rongping<sup>1)</sup> Song Tao<sup>1)</sup>

1) Department of Mechanical Engineering, USTB, Beijing 100083, PRC

2) Department of Automation, USTB

**ABSTRACT** The mathematical formulas for roundness measurement has been descussed firstly based on the tri-probe error separation technique. Then the slideaverage method and digital filtering method employed in the data processing were discussed, these methods can effectiveoy control the interference signal and raise the signal/noise ratio. It is examined exeperimentally that the accuracy of roundness measurementcan be remarkably improved with these methlods.

**KEY WORDS** roundness measurement, data processing/error separation

大型精密机械零件的形位误差, 对产品性能的影响越来越受到重视, 而这样的大型零件在通常的圆度仪、三坐标测量机等精密测量仪器上不易甚至无法安装和检测. 如何解决这类零件的形位误差的高精度检测, 具有很高的理论和实用价值. 近一二十年迅速发展起来的误差分离技术, 简称 EST 是解决上述课题的一种有效途径. EST 在不提高测量仪原有制造安装精度前提下, 可大幅度提高测量精度. 由于利用计算机进行实时处理, 实现了临床测量.

本文阐述圆度测量的三测头误差分离原理之后, 对采样数据用滑动平均法和数字滤波法作动态处理, 用对比测量实验证明.

### 1 圆度测量的三测头误差分离原理

圆度测量的误差分离技术,主要有多次定位法和多测头法.下面对应用较为广泛的三测头法作一简单介绍.

如图1,3个传感器A、B、C交于O点,作固定的直角坐标系OXY,  $O_1$ 为被测工件回转中心,  $e(\theta), \delta(\theta)$ 为轴系回转误差.

若工件圆度误差为  $s(\theta)$ , 则当工件旋转时, 3个传感器的输出信号为:

$$P_A(\theta) = s(\theta) + e(\theta)\cos\delta(\theta) \tag{1}$$

$$P_B(\theta) = s(\theta - \alpha) + e(\theta)\cos[\delta(\theta) + \alpha] \tag{2}$$

$$P_C(\theta) = s(\theta + \beta) + e(\theta)\cos[\delta(\theta) - \beta] \tag{3}$$

将上述3个信号组合成信号  $P_D(\theta)$ :

$$P_D(\theta) = P_A(\theta) + bP_B(\theta) + cP_C(\theta) \tag{4}$$

其中  $b, c$  为待定系数.

将(1)~(3)式代入(4)式, 整理得:

$$P_D(\theta) = s(\theta) + bs(\theta - \alpha) + cs(\theta + \beta) + e(\theta)\cos\delta(\theta)[1 + b\cos\alpha + c\cos\beta] + e(\theta)\sin\delta(\theta)[-b\sin\alpha + c\sin\beta] \tag{5}$$

为使(5)式中只含有圆度误差, 须使包含有回转误差的项为零. 即适当选择参数, 使:

$$1 + b\cos\alpha + c\cos\beta = 0$$

$$-b\sin\alpha + c\sin\beta = 0$$

解得  $b, c$  分别为:

$$b = -\sin\beta / \sin(\alpha + \beta)$$

$$c = -\sin\alpha / \sin(\alpha + \beta)$$

将  $b, c$  代入(5)式, 即得只包含圆度误差的方程:

$$P_D(\theta) = s(\theta) + bs(\theta - \alpha) + cs(\theta + \beta) \tag{6}$$

实际测量为离散采样, 设采样间隔  $\Delta\theta = 2\pi/N$ ,

则上式离散化为:

$$P_D(k) = s(k) + bs(k - m_1) + cs(k + m_2) \tag{7}$$

其中  $m_1 = \alpha N/2\pi, m_2 = \beta N/2\pi$ , 且  $m_1, m_2$  为整数.

记  $P_D(k)$  的离散傅里叶变换为  $F_D(n)$ , 即:

$$F_D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} P_D(k) e^{-j2\pi n k / N} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

而对(7)式两边取 DFT, 得:

$$F_D(n) = F_S(n) + bF_S(n)e^{-jn\alpha} + cF_S(n)e^{jn\beta}$$

其中  $F_S(n)$  为  $s(k)$  的 DFT, 则由上式得:

$$F_S(n) = F_D(n) / (1 + be^{-jn\alpha} + ce^{jn\beta})$$

令  $W(n) = 1 + be^{-jn\alpha} + ce^{jn\beta}$ . 称其为权函数.

由此得:  $F_S(n) = F_D(n) / W(n)$ .

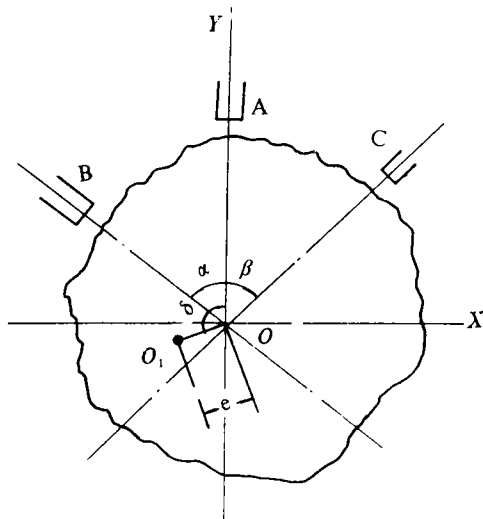


图1 用三测头测量工件圆度误差原理图

对  $F_s(n)$  取傅氏反变换, 即可得工件圆度误差序列:

$$s(k) = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} F_s(n) e^{-j(2n\pi/N)k} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

将其代回 (1) ~ (3) 式, 同时也可求出工件回转误差  $e(\theta)$  和  $\delta(\theta)$ .

## 2 采样数据的数据处理

由于对圆度和直线度形状误差进行动态测量时, 测量数据中一般包含有硬件本身引入的随机误差和工件表面粗糙度引起的误差值, 这两种误差值虽然幅值较小, 但也影响着测量精度, 尤其是对精密工件的测量, 这些影响更是不容忽视. 对采样数据进行数据处理, 就是尽可能减小这两种误差的影响, 提高测量精度.

### 2.1 滑动平均法

动态测试数据  $Y(t)$  一般可认为由具有确定性变化规律的被测变量测量结果  $f(t)$  和随机起伏的零均值测量误差  $e(t)$  组成<sup>[1]</sup>. 由离散化采样后, 有:

$$y_i = f_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

为了抑制随机误差, 可对动态测试数据  $Y(t)$  作平滑处理. 即对相邻  $m$  个数据进行加权平均, 其公式如下:

$$y_j = \sum_{i=j-q}^j W_i y_{i+j} \quad j = q+1, q+2, \dots, N-p \quad (9)$$

其中  $W_j$  为权系数, 且有  $m = p + q + 1$ . 如果取  $p = q = n$ , 则称为中心平滑, 取  $p = 0$ ,  $q = m - 1$ , 称为端点平滑.

权系数  $W_j$  可在  $m$  个相邻数据范围内, 进行多项式最小拟合的基础上来确定. 通常设  $f_j$  在上述小区间内为  $k$  阶多项式, 即:

$$f_j = a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + \dots + a_k j^k \quad (10)$$

代入 (8) 式得:

$$y_{i+j} = a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + \dots + a_k j^k + e_{i+j} \quad (11)$$

通常取  $k < 5$ , 且  $k$  多取 2 或 3, 因此  $k < m$ , 显然上式可采用最小二乘法来估计诸系数  $a_0, a_1, \dots, a_k$ .

滑动平均中存在的一个问题就是所谓的端点效应, 即在全部  $n$  个数据的始末两端缺少应有的加权数据. 如在中心平滑中, 始端的  $y_1, y_2, \dots, y_n$  和末端的  $y_{N-n+1}, y_{N-n+2}, \dots, y_N$  就是如此. 对于这些数据通常仍以其相邻  $m$  个数据采用 (9) 式的不对称数据平滑方法来补充.

### 2.2 数字滤波

形位误差测量中, 测量数据中包含的随机误差量一般属高频成分, 对于这些成分, 可用低通滤波的方法有效地去除<sup>[2]</sup>. 数字低通滤波器一般有无限脉冲响应 IIR 数字滤波器和有

限脉冲响应 FIR 数字滤波器两种。根据具体的测量情况，我们选用第二类即 FIR 数字滤波器，并采用窗函数设计法，现简介如下：

设一理想低通滤波器的频域特性为：

$$H_d(e^{j\Omega}) = \begin{cases} e^{-j\Omega\alpha} & |\Omega| \leq \Omega_c \\ 0 & \Omega_c < |\Omega| < \pi \end{cases}$$

其中若  $\alpha$  为时延，则冲激响应为：

$$h_d(n) = \sin[\Omega_c(n-\alpha)]/\pi(n-\alpha)$$

这样的理想低通滤波器是不可能实现的，这就需要将  $h_d(n)$  乘上窗口序列  $W(n)$ ，截取  $n=0,1,\dots,N-1$  的一段为  $h(n)$ ，为满足线性相位条件，时延  $\alpha$  取为长度的一半： $\alpha=(N-1)/2$ ， $h(n)=h_d(n)W(n)$ 。

如采用哈明 (hamming) 窗函数，有：

$$W(n) = 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/N-1) \quad 0 < n < N-1$$

将上式代入  $h(n)$  表达式，即可求出有限冲激响应  $h(n)$ 。

当输入为  $u(n)$  时，输出为： $y(n)=h(n) \cdot u(n)$

在实际应用中，常表示如下：

$$h_d(n) = \sin(\pi v(n-\alpha))/\pi(n-\alpha)$$

其中  $v = f/f_0$ ， $f$  为滤波器截止频率， $f_0$  为折迭频率， $f_0 = 1/2f_s$ ， $f_s$  为采样频率。

### 2.3 实验结果

实用的测量装置系统结构如图 2 所示：

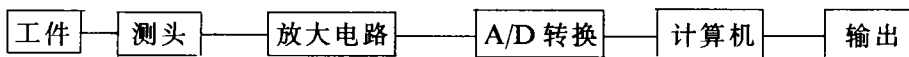


图 2 测量装置

测头采用中原量仪表厂的 DGC-8ZG 电感式位移传感器；放大电路采用 BKT-1 型放大电路；A/D 板采用 LH-sc40 系统通用数据采集卡。测量参数如下：A、B 测头间夹角  $21\pi/64$ ，B、C 测头间夹角  $23\pi/64$ ，采样点数 128，工件原始直径 150mm。同时，用航天部五一四所 FAG32.1 圆度仪测量同一圆盘，最后得到实验数据如附表。

附表 测量实验数据/ $\mu\text{m}$

系统	最小二乘	最大内切	最小外接	最小区域
本 保留噪声	2.56	2.56	2.70	2.48
系 数据平滑	2.31	2.32	2.48	2.24
统 低通滤波	2.40	2.40	2.59	2.32
FAG32.1 圆度仪	2.42	2.56	2.79	2.31

其中，数据平滑采用 5 点 3 次滑动平均，低通滤波中截止频率为  $f_c$  测试数据最高频率为  $f_0$ ，取  $f_c/f_0 = 0.9$ 。

由上表可见，经过适当的数据处理后，测量中的随机成分被抑制，精度得到了提高。这由圆度误差评定中的仲裁标准——最小区域法就可以明显看到：经过数据处理

(下转 556 页)

