

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006260

基于参数估计的精密离心机回转轴线测量方法*

陈爽, 鲁伟俊, 张强, 秦敏

(中国工程物理研究院计量测试中心 绵阳 621900)

摘要:回转轴线的确定作为 10^{-6} 量级精密离心机静态工作半径校准的重要步骤,其准确性将直接影响输出加速度的测量不确定度。根据定义,回转轴线作为虚拟基准,无法通过测量直接得到。针对上述问题,通过高斯滤波、偏心量及倾斜量参数估计、自动化调整,提出了一种基于参数估计的精密离心机回转轴线测量方法,可实现标准圆柱棒几何中心线与回转轴线重合,达到基准转换的目的。利用圆度仪及模拟仿真,验证了滤波算法与参数估计的正确性及有效性;利用精密转台、标准圆柱棒、光谱共焦传感器、六轴并联定位运动平台搭建了回转轴线测量单元。试验结果表明,标准圆柱棒与回转轴线的偏心量可调整至 $0.2\ \mu\text{m}$,倾斜量可调整至 0.0002° 。

关键词:精密离心机;回转轴线;滤波;参数估计;偏心;倾斜

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Rotation axis measurement method for precision centrifuge based on parameter estimation

Chen Shuang, Lu Weijun, Zhang Qiang, Qin Min

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: As an important step to calibrate the static working radius of a 10^{-6} scale precision centrifuge, the accuracy of the rotation axis determination will directly affect the measurement uncertainty of the output acceleration. According to the definition, the rotation axis used as a virtual datum cannot be directly obtained with measurement. Aiming at the above problems, a measurement method for the rotation axis of precision centrifuge based on parameter estimation is proposed using Gaussian filtering, eccentricity and tilt parameter estimation, and automatic adjustment. The method can make the geometric center line of standard cylinder rod coincide with the rotation axis, and achieves the purpose of datum conversion. Roundness meter and emulation experiments were used to verify the correctness and effectiveness of the filtering algorithm and the parameter estimation. A rotation axis measurement unit was built using precision turntable, standard cylinder rod, spectral confocal sensor and six axis parallel positioning motion platform. The test results demonstrate that the eccentricity between the standard cylinder rod and the rotation axis can be adjusted to $0.2\ \mu\text{m}$, and the tilt can also be adjusted to 0.0002° .

Keywords: precision centrifuge; rotation axis; filtering; parameter estimation; eccentricity; tilt

0 引 言

精密离心机主轴回转轴线的确定作为静态工作半径测量过程中的重要步骤,其准确性将直接影响精密离心机输出加速度的测量不确定度^[1]。为将回转轴线这一虚拟基准转换为实物标准器的几何中心线,需对实物标准器进行偏心及倾斜调整,使其重合。目前针对这一研究

方向,贺国权等^[2]为实现回转零件的非接触自动测量,利用激光头等部件设计了偏心自动调整机构,并通过电路设计,减小定心误差至 $0.1\ \text{mm}$ 。但由于所用的激光头易受电磁及环境光干扰,测量精度较低,偏心调整主要依靠伺服电机及滚珠丝杠的方式进行驱动,调整精度较低;杨仁平等^[3]为实现回转曲面准确测量,利用非接触激光三角法位移传感器、回转工作台搭建了自动定心装置,并通过试验验证了偏心调整效果约为 $0.02\ \text{mm}$ 。但由于无法

准确标定出位移传感器的测量方向与偏心调整运动方向的夹角,存在较大的偏心估计误差,调整效率较低。宋康等^[4]为减小圆柱度误差测量中的工件倾斜误差,设计并分析了两点垂直分布的调平方法。根据工件轴线的方向余弦,计算得到了两点调整的高度值,实现了快速精确调平。但在实际应用过程中,由于无法准确确定三点调平面法向量与圆度仪回转坐标系的夹角,存在较大的调整误差,调整效率及调整精度受到较大制约;张瑞等^[5]依据倾斜圆柱横截面为椭圆,提出了一种新的单截面椭圆测量自动对中控制算法,依据调整运动的不同,提出了两种对中调节方法。但在参数估计模型中需要假设圆柱的下截面在回转中心处,这在偏心及倾斜调整实际运用中是难以做到的。

本文提出了一种基于参数估计及姿态调整的 10^{-6} 量级精密离心机回转轴线测量方法,可实现基准转换,便于静态半径的直接测量。并设计了高斯数字滤波器,以减少测量信号的干扰;基于截面法,构建了偏心量、倾斜量的参数估计模型、坐标解算模型及调心调倾的调整控制逻辑。本文分别对高斯滤波器的滤波效果及正确性、参数估计算法的准确性、调心调倾的性能及效率开展了试验验证。

1 测量原理

图1所示为精密离心回转轴线测量原理,主要包括:标准圆柱棒、六轴并联定位运动平台、光谱共焦传感器、圆光栅编码器、控制器等。

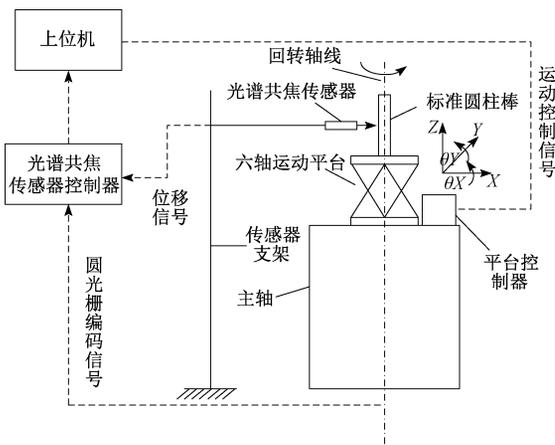


图1 回转轴线测量原理

Fig. 1 The principle of rotation axis measurement

当精密离心机在低速工况下平稳旋转时,以精密离心机圆光栅编码信号作为位置触发信号,通过光谱共焦传感器实现标准圆柱棒径向上位移变化量的等角度采样。同时,对采集到的信号经过滤波处理,采用参数估计

算法实现标准圆柱棒的偏心量与倾斜量的确定。最终由六轴并联定位运动平台实现标准圆柱棒在 X 、 Y 、 Z 、 θ_x 、 θ_y 5个自由度下的姿态调整,使其几何中心轴线与精密离心机的回转轴线重合,从而实现基准转换。

2 数字滤波器

在标准圆柱棒圆轮廓测量过程中,传感器的采样数据为复合信号,包含有波纹度、表面粗糙度、电气噪声、振动等信息。同时,国家标准 GB/T 1958-2004 中也规定了在轮廓测量中,表面粗糙度、划痕、擦伤及塌边等信息应排除在外。因此需要对采样信号进行滤波提取^[6-7]。而高斯滤波器具有零相移的特性,可满足能量密度定义的时域宽积最小条件^[8]。

根据 ISO 11562, 高斯滤波器的权函数定义为^[9]:

$$s(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \exp\left[-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_c}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中: $\alpha = \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}} = 0.4697$; x 表示离开权函数对称中心的距离; λ_c 表示低通高斯滤波器的截止波长。

截面圆轮廓滤波中,截止波长一般用截止波数代替,单位为 UPR (每周波数)。设等间隔采样点数为 N ; 截止波数为 N_c ; 被测工件的直径为 D , 则截止波长和截止波数的关系可表示为:

$$\lambda_c = \frac{\pi D}{N_c} \quad (2)$$

由于等间隔采样,所以 $x = i\Delta x$, 可得:

$$s(i\Delta x) = s\left(i\frac{\pi D}{N}\right) = \frac{1}{\pi D} \frac{N_c}{\alpha} \exp\left[-\pi\left(\frac{iN_c}{\alpha N}\right)^2\right] \quad (3)$$

采样信号是工件截面圆轮廓的相对变化量,与工件的具体直径大小无关,高斯滤波器的权函数不依赖于具体的工件直径,故式(3)可改写为^[10-11]:

$$s(i) = \frac{N_c}{\alpha} \exp\left[-\pi\left(\frac{iN_c}{\alpha N}\right)^2\right] \quad (4)$$

封闭轮廓的高斯滤波过程实际上是将高斯权函数 $h(x)$ 与原始采样轮廓 $z(x)$ 进行一次卷积,得到滤波结果 $w(x)$ 的过程,用离散卷积和的形式表达为:

$$w(i) = \sum_{k=-m}^m z[(i-k)\Delta x] s(k\Delta x) \Delta x \quad (5)$$

式中: $i = m, m+1, \dots, N-m$, m 为高斯权函数的半宽度; N 为采样点数; Δx 表示采样间隔。

由于截面圆轮廓的采样信号具有周期性,在等间隔采样情况下,循环卷积和可以采用离散傅里叶变化的快速方法(FFT)进行计算,则:

$$\begin{cases} Z(\omega_i) = DFT(z(i)) \\ H(\omega_i) = DFT(s(i)) \\ w(i) = IDFT(Z(\omega_i) * H(\omega_i)) \end{cases} \quad (6)$$

取采样点数目 N (一般为 2 的整数次幂), 截止波数 N_c 。则高斯权函数的半宽度为 $m = \left\lceil \frac{N}{N_c} \right\rceil$ 。然后对式(4)进行归一化处理:

$$\tilde{s}(i) = \frac{s(i)}{\sum_{i=-m}^m s(i)}, i = -m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m \quad (7)$$

要对高斯权函数 $s(i)$ 做 *FFT* 变换, 应使权函数的长度与原始采样信号 $z(i)$ 长度一致, 因此, 需要对高斯权函数进行补零。对归一化处理后的 $\tilde{s}(i)$ 两端进行补零, 使其长度为 N , 补零后的高斯权函数中心对称^[10]。

$$\tilde{s}'(j) = \begin{cases} 0, & j = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ \tilde{s}(i), & i = -m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m; \\ & j = \frac{N}{2} - m, \dots, \frac{N}{2} + m \\ 0, & j = \frac{N}{2} + m + 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (8)$$

为了消除边界效应造成的影响, 需要对补零后的归一化高斯权函数 $\tilde{s}'(j)$ 进行翻转, 使 $\tilde{s}'(j)$ 的半宽分别处于权函数的两端, 则:

$$s(k) = \begin{cases} s'(j), & j = \frac{N}{2}, \dots, N - 1; k = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ s'(j), & j = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1; k = \frac{N}{2}, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (9)$$

对高斯权函数进行归一化、补零、翻转等处理后得到 $s(k), k = 0, 1, \dots, N - 1$, 即可按式(6)进行高斯滤波。

3 参数估计

对标准圆柱棒进行参数估计时, 可以采用多种采样策略。常见的有螺旋线法、截面法、束线法还有鸟笼法。本文采用截面法来估计标准圆柱棒的偏心量和倾斜量^[12-15]。图 2 所示为使用截面回转法进行偏心及倾斜参数最小二乘估计的模型。

设采样截面数为 P , 每个截面的采样点数为 n 。以精密离心机回转轴线为 Z 轴建立直角坐标系, 使 X 轴正向对应采样角的 0° 方向, Y 轴正向对应采样 90° 方向。对第 j 个测量截面 ($j = 1, 2, \dots, p$), O_j 是标准圆柱棒几何轴线与采样截面的交点, 即圆柱截面的几何中心, e_j 是偏心量, α_j 是偏心角, R 是传感器零示值半径, r_0 是标准圆柱棒的最小二乘半径, 对截面 j 的第 i 个测量点 $P_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$, 测量点到精密离心机回转中心的距离为 r_{ij} , 到标准圆

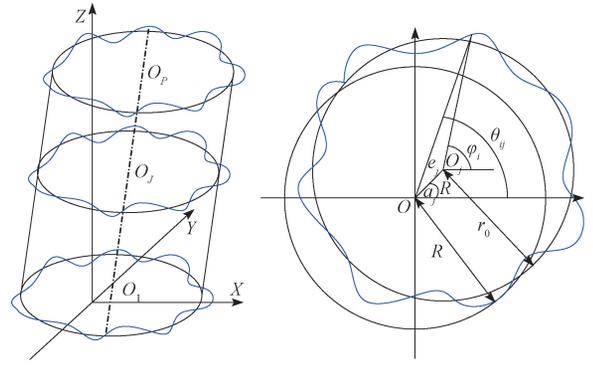


图 2 偏心、倾斜参数估计模型

Fig. 2 The eccentricity, tilt parameter estimation models

柱棒几何中心的距离为 r_{0ij} , 对回转中心的采样角度为 θ_{ij} , 标准圆柱棒几何中心的采样角为 φ_{ij} 。设标准圆柱棒的第一个测量截面沿 X 轴和 Y 轴的偏心量分别为 a, b 。设标准圆柱棒轴线的方向向量为 $(l, m, 1)$, 则对第 j 个测量截面有 $a_j = a + lz_j = e_j \cos \alpha_j, b_j = b + mz_j = e_j \sin \alpha_j$ 。

由此可以得到第 j 个截面的测量方程为:

$$r_{ij} = e_j \cos(\theta_{ij} - \alpha_j) + \sqrt{r_{0ij}^2 - e_j^2 \sin^2(\theta_{ij} - \alpha_j)} \quad (10)$$

将式(10)进行泰勒展开可得:

$$r_{ij} = e_j \cos(\theta_{ij} - \alpha_j) + r_{0ij} - \frac{e_j^2}{2r_{0ij}} \sin^2(\theta_{ij} - \alpha_j) + \dots \quad (11)$$

当偏心 e 相对于标准圆柱棒半径 r_0 足够小, 式(11)可以线性化为^[16]:

$$r_{ij} = r_0 + \Delta r_{0ij} + (a + lz_j) \cos \theta_{ij} + (b + mz_j) \sin \theta_{ij} \quad (12)$$

式中: Δr_{0ij} 为测量点到回转中心距离与标准圆柱棒最小二乘半径的残差。

要从一组测量数据中得到偏心量和轴线方向的估计, 由最小二乘条件:

$$f(r_0, a, b, l, m) = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \Delta r_{0ij}^2 = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n [r_{ij} - r_0 - (a + lz_j) \cos \theta_{ij} - (b + mz_j) \sin \theta_{ij}]^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

可得:

$$\frac{\partial f}{\partial r_0} = -2 \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n r_{ij} - [r_0 + (a + lz_j) \cos \theta_{ij} + (b + mz_j) \sin \theta_{ij}] = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \cos \theta_{ij} \{ r_{ij} - [r_0 + (a + lz_j) \cos \theta_{ij} + (b + mz_j) \sin \theta_{ij}] \} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = -2 \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin \theta_{ij} \{ r_{ij} - [r_0 + (a + lz_j) \cos \theta_{ij} + (b + mz_j) \sin \theta_{ij}] \} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial l} &= -2 \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} \{r_{ij} - [r_0 + (a + lz_j) \cos\theta_{ij} + \\ &(b + mz_j) \sin\theta_{ij}] \} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial m} &= -2 \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \{r_{ij} - [r_0 + (a + lz_j) \cos\theta_{ij} + \\ &(b + mz_j) \sin\theta_{ij}] \} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} pn & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \cos^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \cos^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \sin^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin^2\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \cos^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j^2 \sum_{i=1}^n \cos^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j^2 \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \sin^2\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j^2 \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \cos\theta_{ij} & \sum_{j=1}^p z_j^2 \sum_{i=1}^n \sin\theta_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ a \\ b \\ l \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \Delta r_{ij} \\ \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \Delta r_{ij} \cos\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \Delta r_{ij} \sin\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \Delta r_{ij} \cos\theta_{ij} \\ \sum_{j=1}^p z_j \sum_{i=1}^n \Delta r_{ij} \sin\theta_{ij} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4 调心调倾

4.1 坐标系解算

由于标准圆柱棒轮廓测量是以圆光栅的零点信号作为采样起点,而六轴并联定位平台 X 或 Y 轴驱动方向很难在装配上保证和采样点重合,即采样坐标系和调心坐标系之间存在一个夹角。因此,需对调心坐标系和测量坐标系之间的夹角 φ 进行标定。首先对标准圆柱棒的某一截面进行测量,获得测量数据 x_1 ,得到偏心量和偏心角的估计值,分别记为 e_1, α_1 。然后,驱动运动平台沿着 X 轴方向移动一定位移,再次进行测量,获得第 2 组测量数据 x_2 ,得到偏心量和偏心角的估计值,分别记为 e_2, α_2 。由于两次测量的区别仅在于运动平台 X 方向上运动了固定距离,即两次偏心向量差向量的方向就是所要标定的运动平台 X 轴方向^[17]。由向量之间的运算关系可以得到夹角 φ 。

$$\varphi = \tan^{-1} [(e_2 \sin\alpha_2 - e_1 \sin\alpha_1) / (e_2 \cos\alpha_2 - e_1 \cos\alpha_1)] \quad (16)$$

图 3 所示为运动平台 X、Y 轴方向和采样起点夹角的几何位置关系。其中 X 轴和 Y 轴方向正交, X 轴方向与采样起点方向之间的夹角为 φ , 参数估计得到的偏心量和偏心角分别为 e, α , 则偏心在 X 轴方向投影 c_x 和在 Y 轴方向投影 c_y 可由式 (17) 得到。

$$\begin{cases} c_x = e \cos(\varphi - \alpha) \\ c_y = e \sin(\varphi - \alpha) \end{cases} \quad (17)$$

图 4 所示为通过测量标准圆柱棒上下两个截面进行倾斜量坐标解算。其中 O_1 是下截面的几何中心, O_2 是上截面的几何中心。 O_1O_2 是轴线, 其在图 4 直角坐标系中的坐标为 $(l, m, 1)$ 。调倾的目标是使 O_1O_2 与 Z 轴重

设 Δ_{ij} 为光谱共焦传感器的在 P_{ij} 点的示值变化量, 则 $r_{ij} = R_j + \Delta_{ij}$, 式 (14) 可以表示为式 (15)。求解上述线性方程组即可得到标准圆柱棒轴线方向向量、偏心量的最小二乘估计值。通过轴线的方向向量就可以求解出标准圆柱棒几何中心线的倾斜角, 为倾斜调整提供反馈量。

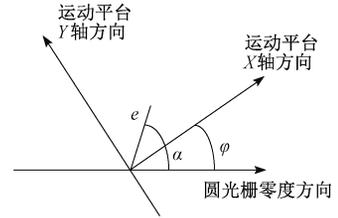


图 3 调心坐标系与测量坐标系关系

Fig. 3 The relationship between the eccentricity adjustment coordinate system and measurement coordinate system

合。假定 O_1 在调整过程中是不变的。调整后 O_2 的坐标将变为 $(0, 0, \sqrt{1 + m^2 + l^2})$ 。由于倾斜量调整相当于坐标旋转。如果首先驱动运动平台绕 X 轴旋转的角度量为 α , 绕 Y 轴旋转的角度量为 β , 则有坐标变换关系:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{1 + l^2 + m^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l & m & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

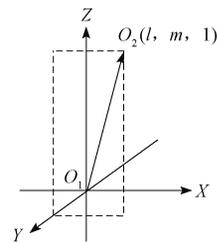


图 4 倾斜量坐标解算模型

Fig. 4 Solution model of tilt coordinate

由此可以得到绕 X 轴、Y 轴旋转的角度量:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan m \\ \beta = \arctan \frac{l}{m \sin \alpha + \cos \alpha} \end{cases} \quad (19)$$

4.2 控制逻辑

要确定标准圆柱棒的轴线方向,需要测量它的两个截面。每进行一次倾斜调整,上下截面的偏心量都会发生变化,即产生平移和旋转的耦合效应。因此,若先进行调心操作,势必会大大降低调整效率。同时,若先进行调倾操作,有可能会发生测量截面偏心量发生较大变化,超出传感器量程。因此,本装置通过平移旋转中心至测量截面以减小偏心量的变化,然后调倾,在调倾收敛后,再进行调心操作。整个调整流程如图5所示。

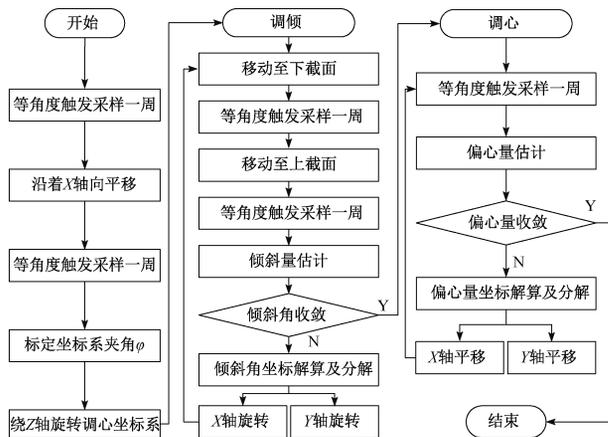


图5 调心调倾控制逻辑

Fig. 5 The control logic of eccentricity and tilt adjustment

5 试验验证

5.1 滤波算法

为了验证滤波算法的正确性及有效性,采用 Taylor Hobson 公司的 Talyround395 高精度圆度仪(圆度测量不确定度为: $U=0.026 \mu\text{m}, k=2$) 作为的标准进行试验,其滤波算法经过德国 PTB 认证。利用高精度圆度仪对标准圆柱棒的轮廓信号进行采集,然后利用本文的高斯滤波器进行滤波,采集的原始轮廓信号与设计的高斯滤波器滤波后的信号如图6所示。

从图6可以看出,本文的高斯滤波器对圆轮廓信号有很好的低通滤波效果,波纹度、粗糙度及噪声等中高频信号都得到了有效滤除。同时,整体轮廓信息没有发生明显的失真及畸变。

将圆度仪滤波后的数据与设计的高斯滤波器滤波后的数据进行对比,如图7(a)所示。可以看出本文的高斯

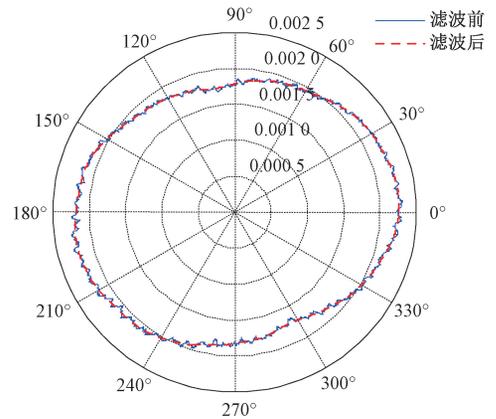
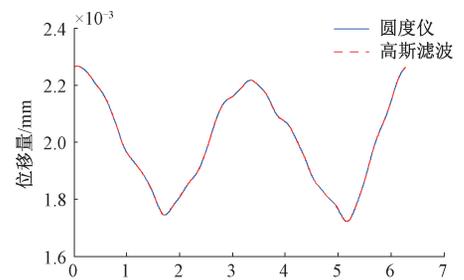


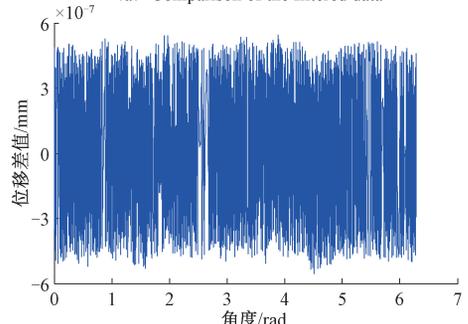
图6 标准圆柱棒轮廓信号滤波效果对比

Fig. 6 Filtering effect comparison of standard cylinder rod profile signal



(a) 滤波后数据对比

(a) Comparison of the filtered data



(b) 滤波后数据差值运算

(b) Difference operation of the filtered data

图7 高斯滤波器的准确性验证

Fig. 7 Accuracy verification of the Gaussian filter

滤波器滤波后的数据与圆度仪的数据基本重合或一致。图7(b)所示为两个滤波后数据做差的结果,数据差异基本在 10^{-7} mm 量级内,可忽略不计。

5.2 偏心估计

将圆度仪采集的原始信号添加理论的偏心量及偏心角,与经过高斯滤波后及参数估计得到的偏心量及偏心角进行对比,如表1所示。从表1中可以看出,在偏心量为 $1 \mu\text{m}$ 时,偏心量的估计误差约为 $0.04 \mu\text{m}$,偏心角估计误差约为 0.0005° 。当偏心量增大至 1mm 时,偏

心量估计误差增大至 5 μm , 偏心角估计误差约为 0° 。而对于本装置期望的 0.2 μm 偏心调整量来说, 偏心量 e 远小于标准圆柱棒的半径 ($r_0 = 21 \text{ mm}$), 一般认为 e/r_0 在 10^{-3} 量级上, 估计误差可基本忽略不计^[16]。

表 1 偏心估计算法验证

Table 1 Verification of the eccentricity estimation algorithm

理论值		估计值	
偏心量/ μm	偏心角/ $(^\circ)$	偏心量/ μm	偏心角/ $(^\circ)$
1	60	0.999 97	60.000 5
1	160	0.999 98	160.000 1
1	260	0.999 97	259.999 5
1	350	0.999 96	350
1 000	60	996.9	60
1 000	160	996.9	160
1 000	260	996.9	260
1 000	350	996.9	350

5.3 应用性能

为了验证回转轴线测量方法的应用性能, 搭建回转轴线测量单元试验验证平台, 主要包括: 大理石平台、精密转台、六轴并联定位运动平台(技术指标如表 2 所示)、光谱共焦传感器(技术指标如表 3 所示)、标准圆柱棒、导电滑环、俯仰倾斜调整台、双轴位移调整平台、弹性联轴器及辅助工装夹具等, 如图 8 所示。

表 2 六轴并联定位运动平台技术指标

Table 2 Technical specification of the six-axis parallel positioning motion platform

参数	数值
X 向行程/ mm	± 17
Y 向行程/ mm	± 16
Z 向行程/ mm	± 6.5
θ_x, θ_y 向行程/ $(^\circ)$	± 10
X、Y 向步长/ μm	0.2
Z 向步长/ μm	0.1
θ_x, θ_y 向步长/ (\prime)	0.5
X、Y 向重复性/ μm	0.2
Z 向重复性/ μm	0.1
θ_x, θ_y 向重复性/ (\prime)	0.5

表 3 光谱共焦传感器技术指标

Table 3 Technical specification of the spectral confocal sensor

参数	数值
量程/ mm	0.3
光斑直径/ μm	6
线性度/ $\%$	0.02
分辨力/ μm	0.01
反射角/ $(^\circ)$	± 34
测量频率/ kHz	25

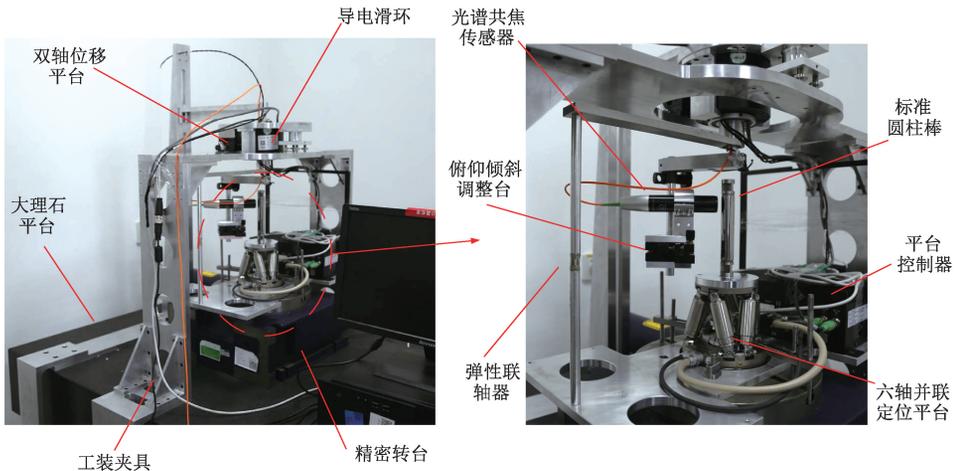


图 8 回转轴线测量单元试验验证平台

Fig. 8 Experiment verification platform for the rotation axis measurement unit

其中精密转台主要是模拟精密离心机主轴旋转, 并提供圆光栅编码信号; 导电滑环主要为平台控制提供供电及信号传输功能, 并随转台一致旋转, 避免线缆的缠绕; 俯仰倾斜调整台主要是便于光谱共焦传感器角度调

整, 寻找拐点, 保证测量方向垂直于 Z 轴, 并偏离回转中心较小。

图 9 所示为偏心调整的过程及最终结果。从图 9 中可以看出偏心量可调整至 0.000 2 mm, 且从 0.025 mm

调整至 0.0002 mm 大概需 3 次偏心调整,验证了偏心调整的有效性。通过测量上下两个截面,得到初始倾斜角为 0.0492° 后的调整过程数据如表 4 所示。从表 4 中可

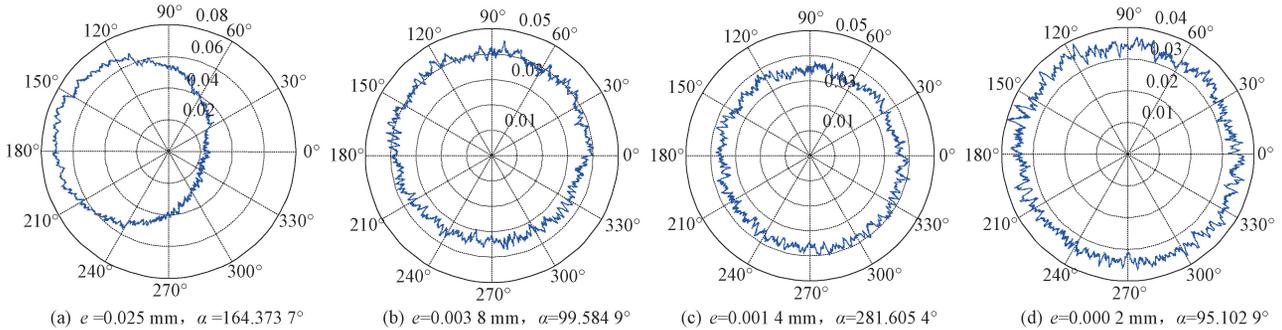


图9 偏心调整过程及结果

Fig.9 Eccentricity adjustment process and result

表4 优化前倾斜调整过程及结果

Table 4 Tilt adjustment process and result before optimization

调整次数	绕 X 轴调整量	绕 Y 轴调整量	调整后倾斜角
1	-0.0492°	-0.0012°	0.0026°
2	-0.0014°	-0.0022°	0.0021°
3	-0.0017°	0.0013°	0.0020°
4	0.0002°	-0.0020°	0.0024°

为此,对倾斜调整控制逻辑及算法进行了优化,在第 1 次调整倾斜角大幅减小后,采用半步逼近法,即将在估计的倾斜调整量基础上,调整一半,并循环逼近。优化流程和算法后的调整过程及结果如表 5 所示,初始倾斜角为 0.0503° 。可以看出,在经过两次调整后,倾斜量已变为 0.0002° 。

表5 优化后倾斜调整过程及结果

Table 5 Tilt adjustment process and result after optimization

调整次数	绕 X 轴调整量	绕 Y 轴调整量	调整后倾斜角
1	-0.0503°	-0.0007°	0.0034°
2	-0.0011°	-0.0013°	0.0002°

6 结 论

本文提出一种基于参数估计的 10^{-6} 量级精密离心机回转轴线测量方法,可将标准圆柱棒的几何中心线调整至与精密离心机回转轴线重合,实现基准转换,便于直接测量;为排除原始传感器原始测量信号中粗糙

以看出在经过第 1 次调整后倾斜角大幅减小后,虽经过多调整,但由于倾斜量估计误差及调整误差的存在,其极限仅为 0.0024° ,无法满足预期要求。

度、波纹度、振动等信号干扰,设计了高斯数字滤波器;基于截面法,构建了标准圆柱棒偏心量、倾斜量的参数估计模型;由偏心倾斜估计参数,构建了坐标解算模型,并基于效率及准确度的考虑,完成了调心调倾的控制逻辑;通过采用滤波算法经过德国 PTB 认证的高准确度圆度仪进行滤波效果试验,滤波效果明显,与圆度仪滤波数据基本一致,差异仅在 10^{-7} mm 量级;过在原始圆柱轮廓信号中加入理论偏心量及偏心角,利用参数估计算法进行试验仿真,结果表明,对于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 偏心量期望值来说,参数估计算法误差基本可忽略不计;基于精密转台、光谱共焦传感器、六轴并联定位平台、标准圆柱棒等,搭建了回转轴线测量单元试验平台。结果表明,标准圆柱棒与主轴回转轴线的偏心量可调整至 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,倾斜量可调整至 0.0002° ,验证了精密离心机回转轴线测量方法的有效性及其正确性,为后期静态工作半径的校准奠定了基础。

参考文献

- [1] 吴付岗,王军. 精密离心机加速度载荷模型研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18):36-40.
WU F G, WANG J. Research on acceleration load model of precision centrifuge [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18):36-40.
- [2] 贺国权,罗军,刘书桂. 提高零件轮廓测量机偏心调整精度的方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(3): 217-221.
HE G Q, LUO J, LIU S H G. Improving offset adjusting accuracy for contour measuring machine [J].

- Nanotechnology and Precision Engineering, 2008, 6(3): 217-221.
- [3] 杨仁平, 张国雄, 刘书桂, 等. 回转曲面测量技术[J]. 天津大学学报, 2005, 38(5): 385-390.
YANG R P, ZHANG G X, LIU SH G, et al. Sculptured surface of rotation measuring technique [J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(5): 385-390.
- [4] 宋康, 廖俊必, 林长青, 等. 圆度仪的调平和圆柱度误差评定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3360-3367.
SONG K, LIAO J B, LIN CH Q, et al. Leveling and cylindricity error assessment for roundness measuring instrument [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3360-3367.
- [5] 张瑞, 卢好蕊, 张林娜, 等. 圆柱度仪单截面自动对中调节方法的研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(1): 11-14.
ZHANG R, LU H R, ZHANG L N, et al. Research on self-centering control method of cylindricity measuring instrument [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(1): 11-14.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差检测规定: GB/T 1958-2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Geometrical product specification (GPS) geometrical tolerance verification prescription: GB/T 1958-2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [7] 张浩, 袁怡宝. 基于逼近样条方法的高斯表面轮廓滤波[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(6): 1698-1703.
ZHANG H, YUAN Y B. Gaussian profile filter based on approximating spline [J]. Journal of Jilin University (Engineer and Technology Edition), 2010, 40(6): 1698-1703.
- [8] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 高斯滤波稳健性能的研究与改进[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 633-637.
LI H F, JIANG X Q, LI ZH. Study and improvement of robust performance of Gaussian filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(5): 633-637.
- [9] IX-ISO. Geometrical product specification (GPS)-surface texture: Profile method-metrological characteristics of phase correct filters: ISO 11562 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1996.
- [10] MURALIKRISHNAN B, RAJA J. Computational surface and roundness metrology [M]. UK: Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [11] 许景波, 袁怡宝. 圆度测量中的高斯滤波快速算法[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(3): 342-345.
XU J B, YUAN Y B. Fast Gaussian filtering algorithm for roundness measurements [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(3): 342-345.
- [12] MURTHY T S R, RAO S Y. A simple approach for evaluation of cylindrical surfaces [J]. Annals of the CIRP, 1981, 30(1): 441-444.
- [13] 邢书剑, 曲兴华, 王晟, 等. 采用高精度自动定心机构的大尺寸内径测量[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1681-1687.
XING SH J, QU X H, WANG SH, et al. Larger-scale inner diameter measurement with high precision automatic centering device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1681-1687.
- [14] 雷贤卿, 李言, 李济顺, 等. 圆柱度的三点法测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 944-951.
LEI X Q, LI Y, LI J SH, et al. Measurement techniques of cylindricity with three-point method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(5): 944-951.
- [15] 雷贤卿, 李言, 周彦伟, 等. 截面最小二乘圆心偏心误差运动的分离方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 153-156.
LEI X Q, LI Y, ZHOU Y W, et al. Separating method for eccentric motion of least square center of cross section [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 153-156.
- [16] 谭久彬. 精密测量中的误差补偿技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
TAN J B. Error compensation technology in precision measurement [M]. Harbin: Journal of Harbin Institute of Technology, 1995.
- [17] 丁晓晖. 圆柱轮廓精密测量中的滤波与调心调倾技术

研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

DING X H. Research on filtering and adjustment of centering and tilting technologies in precision measurement of cylindrical profile[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.

作者简介



陈爽, 2010年和2013年于重庆大学分别获得学士学位和硕士学位, 现为中国工程物理研究院计量测试中心工程师, 主要研究方向为几何量精密测试技术。

E-mail: 151831441@qq.com

Chen Shuang received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University in 2010 and 2013, respectively. Currently, he is an engineer in Metrology and Testing Center,

CAEP. His main research interests include precision geometric quantity measurement technology.



鲁伟俊, 2015年于南京理工大学获得学士学位, 2018年于西北工业大学获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院计量测试中心助理工程师, 主要研究方向为几何量精密测试技术。

E-mail: 470235451@qq.com

Lu Weijun received his B.Sc. degree from Nanjing University of Science & Technology in 2015 and received his M.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2018. Currently, he is an assistant engineer in Metrology and Testing Center, CAEP. His main research interests include precision geometric quantity measurement technology.