

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210056

# 基于光谱共焦原理的滚珠螺母多尺度测量方法\*

高峰<sup>1,2</sup>, 郑源<sup>1,2</sup>, 范嘉博<sup>1,2</sup>, 李艳<sup>1,2</sup>, 李文强<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省机械制造装备重点实验室 西安 710048; 2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

**摘要:**针对小尺寸滚珠螺母因其内腔构型较复杂,孔径小,内腔型面数据获取困难,加工质量评定难以为继的问题,提出一种基于光谱共焦原理的滚珠螺母多尺度测量方法。使用非接触式光学位移传感器对其内腔进行分度式轴截面扫描,获取柱坐标系下内腔表面三维点云数据。采用均匀插值滤波剔除滚道—内径处的异常点以及小波阈值法对原始测量数据进行去噪。以二维小波分解的多分辨率分析特性为基础,利用小波分解能量守恒性质自适应确定分解层数,对转换到笛卡尔坐标系中沿母线展开的螺母内腔表面进行不同尺度分解,分别得到用于计算轮廓结构参数的低频成分与用于评定表面粗糙度的高频成分。实验结果表明本文提出的测量方法能够评定滚珠螺母内腔结构尺寸精度及表面加工质量,其重要结构参数如螺距、导程角的加工误差分别为  $2\ \mu\text{m}$  和  $0.016^\circ$ 。

**关键词:** 光谱共焦原理;滚珠螺母内腔测量;二维小波分解;多尺度;粗糙度

**中图分类号:** TH741 TP271 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Multi-scale measurement method of ballscrew nut based on spectral confocal principle

Gao Feng<sup>1,2</sup>, Zheng Yuan<sup>1,2</sup>, Fan Jiabo<sup>1,2</sup>, Li Yan<sup>1,2</sup>, Li Wenqiang<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Mechanical Manufacturing Equipment of Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To address the issue that it is difficult to detect the internal cavity of the small-size ballscrew nut and evaluate its machined surface quality due to its complex internal geometrical configuration and small aperture, a multi-scale measurement method of ballscrew nut based on the spectral confocal principle is proposed. A non-contact optical displacement sensor is used to perform indexed sectional scanning axially for the internal cavity, and three-dimensional point cloud data of the cavity surface expressed in the cylindrical coordinate system are obtained, in which the abnormal points at the interface between the raceway and inner wall are removed by using uniform interpolation filtering. Then, the denoise process is implemented by the wavelet threshold method. Based on the multi-resolution analysis characteristics of the two-dimensional wavelet decomposition, its number of decomposition layers is adaptively determined by means of the energy conservation property of the wavelet decomposition. The inner surface of the screw nut transformed into the Cartesian coordinate system unwrapped along the generatrix is dissociated at different scales, in which the low-frequency components are employed to calculate the profile structure parameters and the high-frequency components for assessing the surface roughness. The inspection results show that the proposed measurement method can evaluate not only the dimensional accuracy of the inner cavity structure but pitch error and lead angle error of the surface quality are  $2\ \mu\text{m}$  and  $0.016^\circ$ , respectively.

**Keywords:** spectral confocal principle; screw nut's internal cavity measurement; two-dimensional wavelet decomposition; multi-scale; roughness



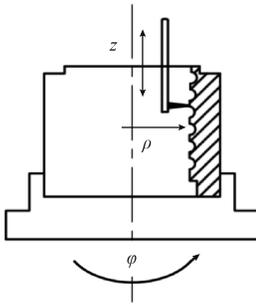


图2 测量空间的圆柱坐标系

Fig. 2 Cylindrical coordinate system of measurement space

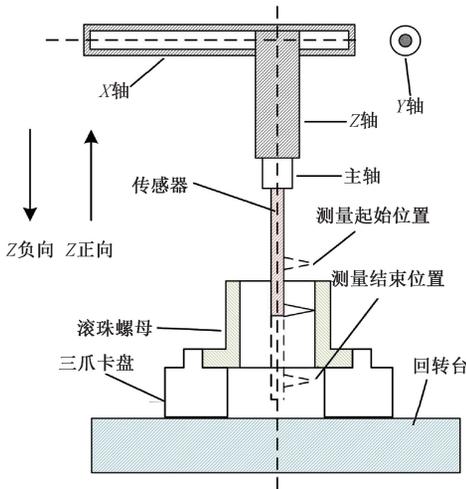


图3 测量方案原理

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement scheme

移传感器按时间顺序采集距当前轴截面内腔的径向距离。当一条轴截面测量完成时,回转台转动一个分度角。重复上述操作,回转台旋转一周,完成整个螺母内表面的测量。

### 1.2 光谱共焦测量原理

光谱共焦传感器主要由白色光源、光学透镜组、光谱仪3部分组成,其光路原理如图4所示。

不同的单色光其波长不同,同一透镜对不同波长的单色光折射率不同、焦距不同,为了在量程内得到足够的焦点以保证测量精度,需要采用一系列特殊的透镜对白光进行分解。在测量中,由光源产生的白光经过透镜组分解为一系列单色光,其焦点在透镜轴上有序排列形成一个密集焦点组。如图4所示,色散透镜组在理想情况下使色散位置  $s_i$  与光波长  $\lambda_i$  以线性关系一一对应,有:

$$s_i = b\lambda_i + c \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中:  $b, c$  为线性系数。

在测量量程内,根据不同的被测物体到透镜的距离,对应一个精确波长的光共焦到被测物体上。共焦位置光

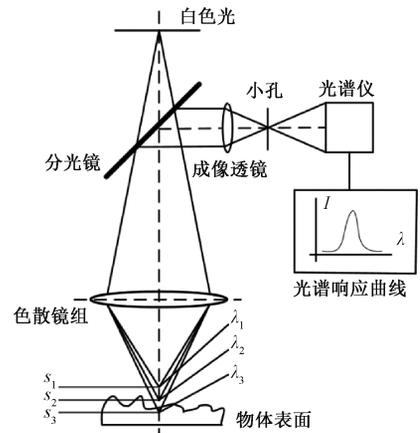


图4 光谱共焦传感器光路原理

Fig. 4 Principle of optical path of spectral confocal sensors

强与离焦量之间的关系为:

$$\begin{cases} I(u) = \left[ \frac{\pi a^2}{\lambda f} \sin c \left( \frac{u}{4} \right) \right]^4 \\ u = \frac{2\pi a^2 \delta_z}{\lambda f^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $a$  为成像透镜孔径;  $\lambda$  为入射光波长;  $f$  为成像透镜焦距;  $\delta_z$  为轴向点离焦量。

由于不同的波长对应不同的距离值,因此根据光谱仪确定的单色光波长,就可获得相应距离值。其测量精度可达纳米级,测量不确定度为  $0.1 \mu\text{m}$ 。

### 1.3 螺母内腔测量实验

在五轴加工中心上进行螺母内腔测量实验,如图5所示。机床直线轴的运动定位精度为  $2 \mu\text{m}$ ,重复定位精度为  $1.8 \mu\text{m}$ ;回转轴的运动定位精度为  $8''$ ,重复定位精度为  $5''$ 。

本实验所用光谱共焦传感器型号为 IFS 2403/90-10,其测量量程为  $10 \text{ mm}$ ,测量精度为  $0.2 \mu\text{m}$ ;探头直径为  $8 \text{ mm}$ 。当光源内置时测量频率最大为  $10 \text{ kHz}$ 。

测量时,  $Z$  向移动量和旋转分度角  $\varphi$  分别由机床  $Z$  轴和  $C$  轴伺服系统获取,径向距离  $\rho$  由传感器获得。选取  $\varphi = 2^\circ$ ,  $Z$  轴进给速度为  $60 \text{ mm/min}$ ,采样频率为  $200 \text{ Hz}$ ,  $Z$  轴与  $C$  轴的联动通过执行数控指令实现。

## 2 实验数据分析

### 2.1 原始数据处理

每条轴向截面的测量值是时间序列数据,该序列具有较好的数据拓扑关系。螺母内腔测量实验共得到  $180$  组时间序列数据。如图6所示为其中一组原始测量数据。由图6可看出,在部分滚道与内径过渡处存在异常点。当传感器光线经过滚道和内径交界处时,如图7中所示  $p$  点,由于被测物轮廓形状发生突变,传感器光束在此

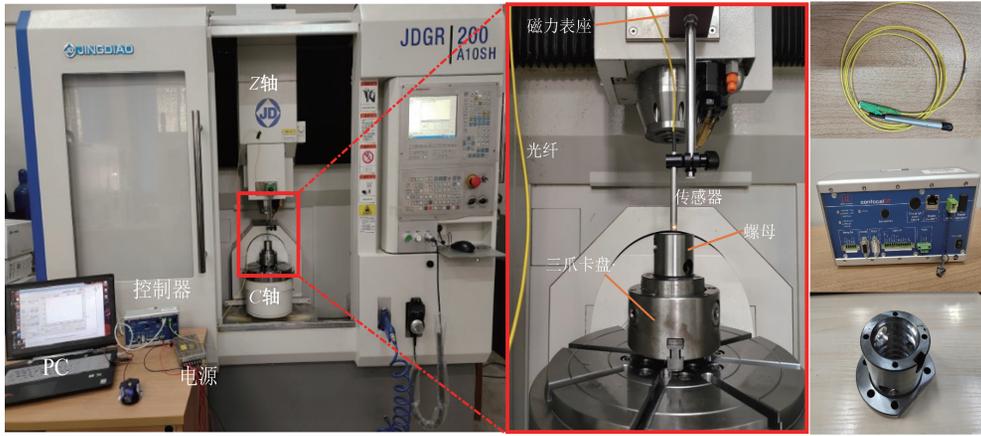


图 5 螺母测量实验

Fig. 5 Measurement experiment of ballscrew nut

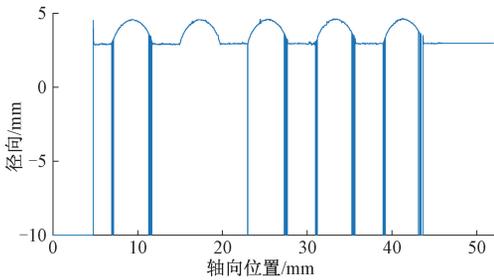


图 6 原始测量数据

Fig. 6 Raw measurement data

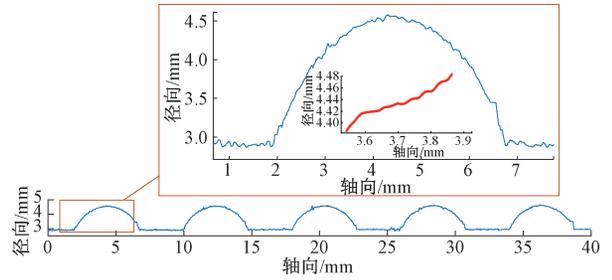


图 8 异常点处理

Fig. 8 Outliers processing

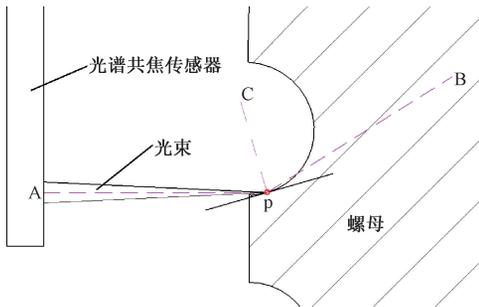


图 7 交界处异常点产生原因

Fig. 7 Cause of outliers at junctions

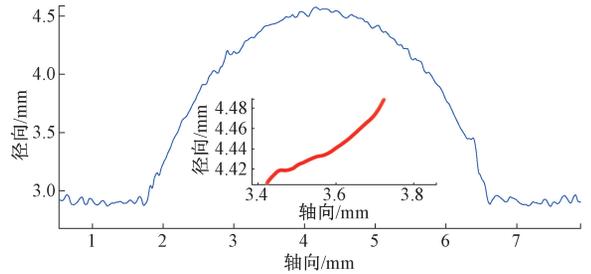


图 9 小波阈值去噪

Fig. 9 Wavelet threshold denoising

处的漫反射光 PB 大部分不能被传感器接收到,导致采样值异常。同样,当传感器光线经过反向器孔处时,也会由于无法接收到反射光而返回异常值。

原始采样数据根据异常点处过渡特性采用均匀插值完成数据预处理,如图 8 所示。将异常点处理后的数据采用小波阈值法进行去噪<sup>[21]</sup>,如图 9 所示。

根据图 3 测量原理,原始测量数据以柱坐标表示为

多组数据点,如:

$$\begin{aligned} & \{(\rho_{11}, \varphi_{11}, z_{11}), (\rho_{12}, \varphi_{12}, z_{12}), \dots, (\rho_{1n}, \varphi_{1n}, z_{1n})\} \\ & \{(\rho_{21}, \varphi_{21}, z_{21}), (\rho_{22}, \varphi_{22}, z_{22}), \dots, (\rho_{2n}, \varphi_{2n}, z_{2n})\} \\ & \vdots \\ & \{(\rho_{m1}, \varphi_{m1}, z_{m1}), (\rho_{m2}, \varphi_{m2}, z_{m2}), \dots, (\rho_{mn}, \varphi_{mn}, z_{mn})\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $m$  和  $n$  分别为轴截面编号和轴截面中的测点编号。将所有柱坐标系下的测点经半径补偿后转换到笛卡尔坐

标系下,转换公式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{mn} & 0 \\ \sin \varphi_{mn} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho_{mn} + d_s \\ z_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $d_s$  为补偿半径,即测量时螺母轴线与传感器轴线垂直距离。

在笛卡尔坐标系下的螺母内腔三维线框模型如图 10 所示。

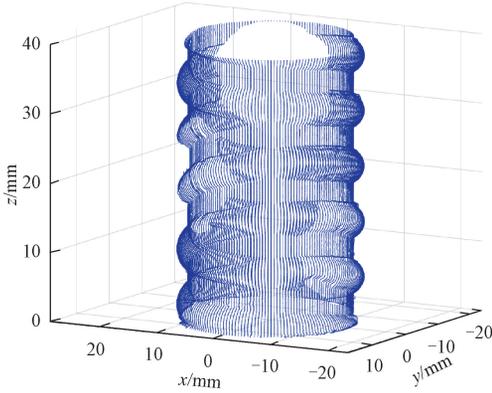


图 10 螺母三维线框模型

Fig. 10 3D wireframe model for ballscrew nut

## 2.2 滚道与内径数据分离

评定螺母结构参数需分离滚道与内径数据。根据内径数据波动范围与加工要求确定波动量阈值,将径向方向上波动量等于阈值的点判定为内径与滚道的交界点。

如图 11 所示,以一条滚道轴向截面为例。设传感器沿滚道截面按时间共采集  $g$  个数据,记为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_g$ ,其中前  $i$  个测量数据的数学期望为:

$$E(X_i) = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_i) / i \quad (i = 1, \dots, g) \quad (5)$$

若第  $(i+1)$  个数据与前  $i$  个数据数学期望的差值等于内径波动量阈值  $\varepsilon$ , 即:

$$\varepsilon = |x_{i+1} - E(X_i)| \quad (6)$$

则将其判定为交界点。考虑到加工精度要求,设定  $\varepsilon = 0.05 \text{ mm}$ ,  $X = E(X_i) \pm \varepsilon$  为允许的内径轮廓变动范围。单滚道截面轮廓数据分离如图 11 所示,其中水平虚线为拟合基准线,两条水平实线间区域为内径轮廓变动范围。

## 3 基于小波分解的多尺度特征提取

螺母内腔表面测量数据中结构参数是三维信号的低频成分,而粗糙度是三维信号的高频成分。对表面轮廓信号进行不同尺度下的分解。

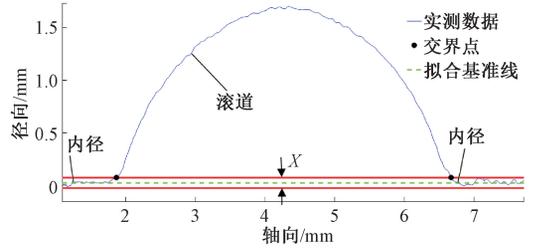


图 11 滚道与内径数据分离

Fig. 11 Separation of raceway and inner wall

### 3.1 二维小波分解原理

采集到的螺母内腔表面信号包含有低频成分  $A_{j-1}$  与高频成分  $D_{j-1}$ ,其中低频成分  $A_{j-1}$  又可以分解为不同尺度下的高频成分与低频成分,即:

$$A_{j-1}(x_1, x_2) = A_j(x_1, x_2) + D_j(x_1, x_2) \quad (7)$$

利用二维小波的多尺度分解特性可将三维信号  $f(x_1, x_2)$  分解为:

$$f(x_1, x_2) = A_0(x_1, x_2) = A_N(x_1, x_2) + D_N(x_1, x_2) + D_{N-1}(x_1, x_2) + \dots + D_1(x_1, x_2) \quad (8)$$

式中:高频信号  $D_j(x_1, x_2)$  由水平高频、垂直高频以及对角高频信号组成:

$$D_j(x_1, x_2) = D_j^{(h)}(x_1, x_2) + D_j^{(v)}(x_1, x_2) + D_j^{(d)}(x_1, x_2) \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_j(x_1, x_2) = \sum_{k_1 \in Z} \sum_{k_2 \in Z} A_{j-1}(x_1, x_2) \phi_{jk_1}(x_1) \phi_{jk_2}(x_2) \\ D_j^{(h)}(x_1, x_2) = \sum_{k_1 \in Z} \sum_{k_2 \in Z} A_{j-1}(x_1, x_2) \phi_{jk_1}(x_1) \psi_{jk_2}(x_2) \\ D_j^{(v)}(x_1, x_2) = \sum_{k_1 \in Z} \sum_{k_2 \in Z} A_{j-1}(x_1, x_2) \psi_{jk_2}(x_1) \phi_{jk_1}(x_2) \\ D_j^{(d)}(x_1, x_2) = \sum_{k_1 \in Z} \sum_{k_2 \in Z} A_{j-1}(x_1, x_2) \psi_{jk_2}(x_1) \psi_{jk_2}(x_2) \end{cases}$$

$$\phi_{jk}(x) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}x - k)$$

$$\psi_{jk}(x) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}x - k)$$

其中,尺度  $j = 1, \dots, N, k_1, k_2 \in Z, \phi_{jk}, \psi_{jk}$  分别表示低通尺度函数和高通小波函数,不同的小波基对应不同的  $\phi_{jk}, \psi_{jk}$ 。

### 3.2 三维轮廓信号分解

螺母内腔测量数据  $f(x, y)$  是表面三维信号的连续采样值。为提取粗糙度信息,需要分离出表征轮廓信息的低频成分作为小波评定基准面  $s_2(x, y)$ ,用来评价结构参数;其余所有高频成分作为表面粗糙度信号  $s_1(x, y)$ 。故表面三维形貌模型为:

$$f(x, y) = s_1(x, y) + s_2(x, y) \quad (10)$$

在工程上多使用经验公式或根据实际情况确定分解尺度,但缺乏普适性。本文利用小波分解的能量守恒性质,采用能够减少相位失真的 sym5 小波基函数进行分解与重构。在高频多次分解过程中,寻找能量拟合不符合指数规律的第  $N$  次,将分解次数定为  $(N - 1)$  次。

将图 10 中滚珠螺母三维线框模型沿周向展开,如图 12 所示。

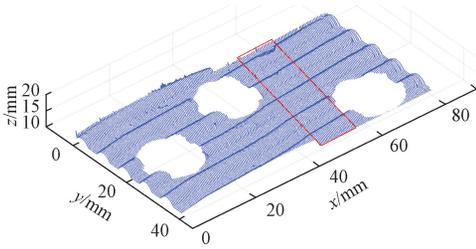


图 12 螺母内腔周向展开图

Fig. 12 Circumferential unwrapping of the nut cavity

用选定的 sym5 小波基函数对图 12 中包含滚道、内径的框选区域进行 5 次小波分解,分别计算低频与高频能量占比如表 1 所示。表 1 中  $M$  为分解次数,  $Ea$  为分解后的低频成分能量,  $EDetail$  为分解后的各层高频成分能量,对其作指数最小二乘拟合,如图 13 所示。

表 1 低频与高频能量占比

Table 1 The energy ratio of low frequency and high frequency

$M$	1	2	3	4	5
$Ea/\%$			99.827 5		
$EDetail/\%$	0.008 8	0.016 3	0.048 6	0.038 8	0.060 0

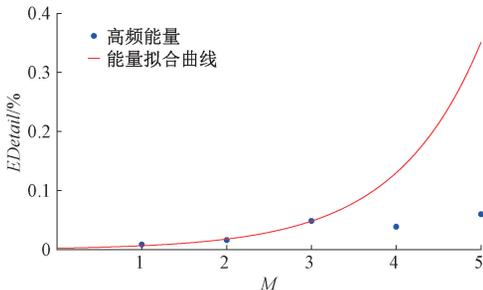


图 13 高频能量指数拟合曲线

Fig. 13 High-frequency energy exponent fitting curve

拟合方程式为:

$$EDetail = 0.002464 \times e^{0.9918M} \quad (11)$$

由图 13 可知,前 3 次分解符合指数规律,故第 4 次分解时会掺杂低频成分,由此确定分解尺度  $N = 3$ 。有:

$$f(x, y) = A_3 + D_3^h + D_3^n + D_3^d + D_2^h + D_2^n + D_2^d + D_1^h + D_1^n + D_1^d \quad (12)$$

## 4 加工质量评定

### 4.1 滚道圆弧轮廓提取

在笛卡尔坐标系中,将单条轴截面滚道的测量数据定义为  $(y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),理论滚道圆弧中心坐标值为  $(C_y, C_z)$ ,半径为  $R$ 。根据最小二乘拟合原理构造误差函数为:

$$\begin{cases} f(C_y, C_z, R) = \sum [(y_i - C_y)^2 + (z_i - C_z)^2 - R^2]^2 \\ \frac{\partial f}{\partial C_y} = 0, \frac{\partial f}{\partial C_z} = 0, \frac{\partial f}{\partial R} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

则滚道圆弧参数可表达为:

$$(C_{jy}, C_{jz}, R_j), (j = 1, 2, \dots, J) \quad (14)$$

式中: $j$ 代表轴截面上不同滚道。

### 4.2 滚珠螺母结构参数辨识

#### 1) 螺距 $P$

滚珠螺母的螺距可表示为:

$$P_{mj} = C_{m(j+1)y} - C_{m(j)y} \quad (j = 1, 2, \dots, J - 1) \quad (15)$$

将所有螺距计算值的平均值作为被测螺母螺距的测量值,有:

$$P = \frac{1}{M \times J} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J P_{mj} \quad (16)$$

螺距跳动记为  $E_p = \max(P_{mj}) - \min(P_{mj})$ 。

#### 2) 节圆半径 $D$

根据图 2 测量空间中的几何关系,螺母的节圆半径可表示为:

$$D_{mj} = d_s + C_{mjz} \quad (17)$$

式中: $D_{mj}$ 是第  $m$  个轴截面,第  $j$  个滚珠丝杠螺母节圆半径的测量值; $d_s$ 是位移传感器轴线与滚珠丝杠螺母轴线的间距; $C_{mjz}$ 是传感器轴线与第  $j$  个滚珠中心的间距。将所有节圆半径的平均值作为节圆半径的测量值  $D$ ,即:

$$D = \frac{1}{M \times J} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J D_{mj} \quad (18)$$

螺母的节圆半径跳动  $E_D$  表示为:

$$E_D = \max(C_{mjz}) - \min(C_{mjz}) \quad (19)$$

#### 3) 导程角 $\varphi_0$

将滚珠螺母内腔沿周向展开,螺旋滚道就变成直滚道,其中心线与水平线之间的角度为导程角。在平面上对属于同一滚道的各圆弧中心点数据进行最小二乘线性拟合,得到线性方程:

$$y_l = k_l x_l + b_l (l = 1, 2, \dots, L) \quad (20)$$

则该位置滚道的导程角  $\varphi_{i0}$  为:

$$\varphi_{i0} = |\arctan(k_i)| \tag{21}$$

滚道导程角的测量值用不同位置处导程角的平均值表示,有:

$$\varphi_0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \varphi_{i0} \tag{22}$$

#### 4) 反向器孔径 $R_f$

根据图 13 的螺母内腔周向展开图,将反向器孔周围点数据投影至  $XOY$  平面,运用滚道轮廓提取方法拟合计算孔径  $R_f$ 。

### 4.3 粗糙度表征参数

三维表面粗糙度可以对滚珠螺母内腔进行全面准确的评定,故分别选取基于均化表面特征与轮廓数据的三维形貌表征参数作为粗糙度评价指标,主要有表面形貌的均方根偏差  $S_q$ ,表面十点高度  $S_z$ ,表面最高分布的偏斜度  $S_{sk}$ ,三维轮廓算术平均偏差  $R_a$ 。

## 5 测量结果分析

### 5.1 螺母内腔多分辨分解

将图 12 中包含滚道、内径的框选区域进行三维表面重构得到实测螺母内腔三维表面,如图 14(a)所示,其沿 A、B 向的滚道投影与内径局部表达分别如图 14(b)、(c)所示。

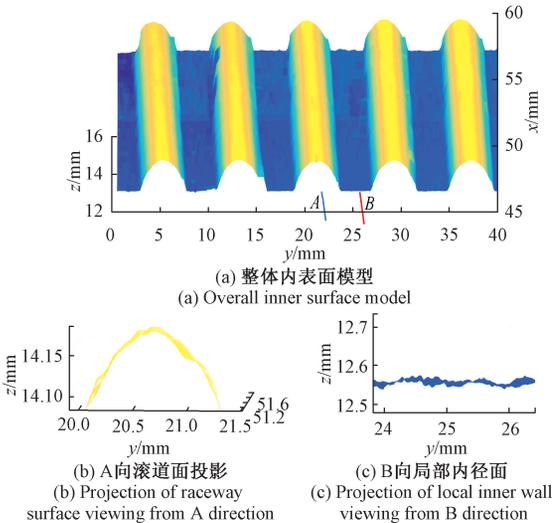


图 14 实测三维内表面

Fig. 14 Measured three-dimensional inner surface

根据 3.2 节中确定的分解层数,对图 14 中的三维整体内表面进行 3 层分解,并重构第 3 层低频成分,结果如图 15(a)所示,沿 A 向、B 向的滚道与内径表面投影如图 15(b)、(c)所示。由图 14(b)、(c)与图 15(b)、(c)可知经过低频重构后,内表面模型变得更为平滑,将

图 15(a)中信号作为用于提取粗糙度的分解内表面信号的小波基准面。

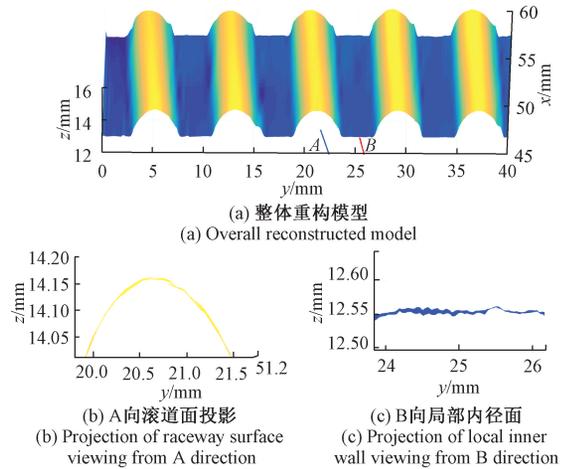


图 15 螺母内表面重构模型

Fig. 15 Reconstructed inner surface model of screw nut

根据 3.2 节中分解的高频成分,重构得到螺母内腔的粗糙表面形貌如图 16(a)所示,取某一相邻内径与滚道的二维表面投影区域如图 16(b)所示。

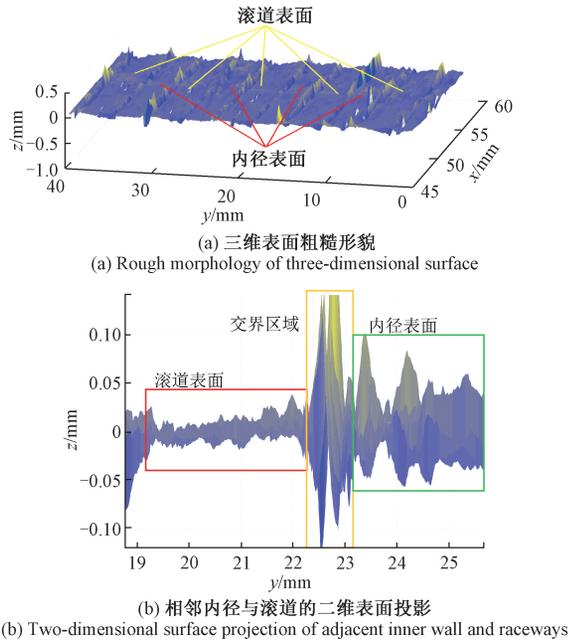


图 16 重构的粗糙表面形貌

Fig. 16 Reconstructed rough surface topography

由图 16(b)可以发现内径表面粗糙度整体大于滚道表面,且二者的交界处粗糙度最大,这与此处不参与传动故磨削精度要求较低以及难以磨削有关。分别选取图 16(a)中不同区域对滚珠螺母内滚道与内径表面进行粗糙度评定。

5.2 评定结果

利用图 15 中的低频重构成分建立的内腔三维轮廓计算螺母结构参数,如图 17 所示。

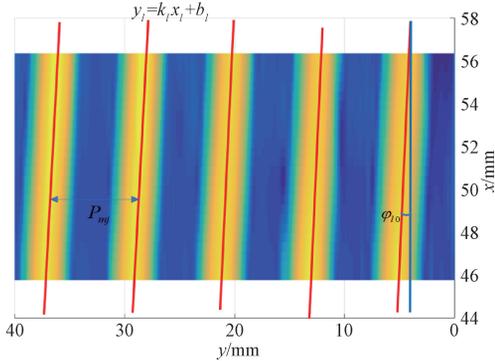


图 17 螺母结构参数分析

Fig. 17 Structural parameter analysis of screw nut

以内腔某一轴向截线数据为例,对其滚道—内径数据分离后进行最小二乘拟合,如图 18 所示。

在图 17 中最右边滚道上均匀选取 25 条轴向截线,提取滚道圆心的 Y 坐标进行最小二乘线性拟合,结果如图 19 所示。其拟合方程式为  $y_i = -0.1016x_i + 9.741$ ,则此处滚道导程角计算结果  $\varphi_{i0} = 5.801^\circ$ 。

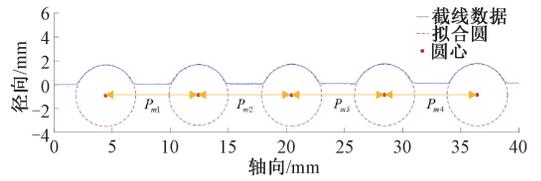


图 18 轴截面圆弧拟合

Fig. 18 Arc fitting of axial section

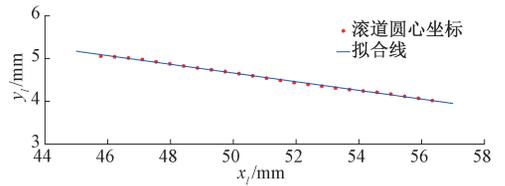


图 19 滚道圆心最小二乘线性拟合

Fig. 19 Least squares linear fitting of the raceway's centers

对每条截线与滚道进行相同操作,螺母加工参数的计算结果如表 2 所示。在图 16(a) 中滚道与内径处各取 2 mm×2 mm 区域计算螺母粗糙度参数如表 3 所示。

表 2 螺母加工尺寸测量结果

Table 2 Nut processing size measurement results

测量项目	螺距 $P/mm$	螺距跳动 $E_P/mm$	导程半径 $D/mm$	导程半径跳动 $E_D/mm$	导程角 $\varphi_0/(^\circ)$	滚道轴向圆 直径 $R/mm$	反向器直径 $R_f/mm$
设计值	8.000	0	12.500	0	5.816	5.160	16.000
测量值	7.998	0.019	12.509	0.031	5.810	5.157	16.113
误差	0.002	-	0.009	-	0.016	0.003	0.113

表 3 螺母不同位置粗糙度评定结果

Table 3 Nut roughness evaluation results in different positions  $\mu m$

位置	均方根偏差 $S_q$	十点高度 $S_z$	偏斜度 $S_{sk}$	平均偏差 $R_a$
内径处	13.0	73.7	-1.684 7	8.4
滚道处	3.6	30.7	-0.128 3	2.3

由测量结果可知,结构尺寸加工精度整体较高,其中导程半径误差为 9  $\mu m$ ;滚道圆直径误差为 3  $\mu m$ ;导程角误差为 0.006 $^\circ$ ;而螺距误差仅为 2  $\mu m$ 。螺距跳动与导程半径跳动分别为 19 和 31  $\mu m$ ,这反映出加工重复性波动较大。反向器直径加工误差达到 113  $\mu m$ ,这主要与反向器内表面边缘轮廓较为粗糙,数据分离较困难有关,故拟合结果会存在一定误差。由表 3 可以看出作为工作面的滚道处的粗糙度均小于内径处。整体粗糙度评定结果偏大,主要原因是螺母内腔磨削困难,在磨削过程中难以检测并及时调整,导致实际磨削效果与设计有一定差距。

6 结 论

针对含有复杂内腔表面的小尺寸滚珠螺母零件,本文根据其内腔结构特点和加工方法,建立了滚珠螺母柱坐标测量空间,采用分度式轴截面扫描法,借助 90 $^\circ$ 特型系列光谱共焦传感器完成了螺母测量,获得了内腔表面数据。从传感器工作原理出发分析了测量过程中异常数据的来源,采用均匀插值剔除异常值,并对测量数据进行了小波阈值去噪。

采用具有良好对称性的 sym5 小波基函数,根据二维小波分解过程中相应的高频能量呈指数增长的能量守恒定律,自适应确定分解层数。运用二维小波分解实现了对滚珠螺母内腔信号中属于轮廓成分的低频信号与属于粗糙度成分的高频信号的分离与重构。实验结果表明,本文提出的滚珠螺母非接触式测量方法可同时完成对螺母加工参数与不同位置处三维粗糙度的评定。被测螺母

的重要结构参数如螺距、导程角的加工误差分别为  $2\ \mu\text{m}$  和  $0.016^\circ$ , 测量结果与理论值具有较高的对应性。可检测的项目类别(螺距、螺距跳动、导程半径、导程半径跳动、导程角、滚道轴向圆直径、反向器直径)与精度能够满足小尺寸螺母的检测要求。

采用高精密度双轴联动的测量方式减小了原始数据的采样误差。所用传感器的分辨力小于  $1\ \mu\text{m}$ (一般滚珠螺母的尺寸公差大于  $10\ \mu\text{m}$ , 形位公差大于  $5\ \mu\text{m}$ )。通过更换不同型号的光学测头, 可实现对不同孔径滚珠螺母的测量, 最小测量孔径可达  $6\ \text{mm}$ 。本文提出的测量与数据处理方法为小尺寸滚珠螺母的加工精度检测提供有效手段, 亦可用于其他含有复杂内腔表面的回转类零件的精密测量与评定。

### 参考文献

- [ 1 ] ZHAO L, FENG H, RONG Q. A novel non-contact measuring system for the thread profile of a ball screw[J]. Mechanical Sciences, 2018,9(1): 15-24.
- [ 2 ] 龚梦辉, 周华西, 周长光, 等. 极限载荷工况下滚珠丝杠副疲劳弹性寿命研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 37-47.  
GONG M H, ZHOU H X, ZHOU CH G, et al. Study on fatigue elastic life of ball screw pair under extreme load conditions[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 37-47.
- [ 3 ] 刘东, 祖莉, 林炜国. 滚珠丝杠副关键加工尺寸误差与预紧转矩关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 17-26.  
LIU D, ZU L, LIN W G. Study on the relationship between key processing size error and preload torque of ball lead screw pairs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 17-26.
- [ 4 ] HARADA H, KAGIWADA T. Grinding of high-lead and gothic-arc profile ball-nuts with free quill-inclination[J]. Precision Engineering, 2004,28(2): 143-151.
- [ 5 ] 杨凤歧, 何东民. 滚珠丝杠螺母内滚道牙形的测量[J]. 计量技术, 1993(1): 1-2.  
YANG F Q, HE D M. Measurement of tooth shape of inner raceway of ball screw nut [J]. Measurement Technology, 1993(1): 1-2.
- [ 6 ] 曾石蕾. 滚珠丝杠副螺旋滚道检测关键技术与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
ZENG SH Q. Key technology and analysis of ball screw spiral raceway detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [ 7 ] CHEN S, ZHAO D, LU Y, et al. A method for detecting alignment deviation on a thread-measuring instrument[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(8): 85001-85002.
- [ 8 ] 王凯, 欧屹, 曾石蕾, 等. 基于激光传感器的滚珠螺母型面测量[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 39-49.  
WANG K, OU Y, ZENG SH Q, et al. Measurement of ball nut profile based on laser sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 39-49.
- [ 9 ] 陈贤高, 祖莉, 欧屹, 等. 滚珠丝杠螺母内滚道型面的检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(5): 102-105.  
CHEN X G, ZU L, OU Y, et al. Detection method of inner raceway profile of ball screw nut [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(5): 102-105.
- [ 10 ] 何亚银, 梁应选, 杨明亮. 滚珠丝杠螺母内滚道位置度的测量[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 106-107.  
HE Y Y, LIANG Y X, YANG M L. Measurement of ball screw nut inner raceway position [J]. Machine Design and Research, 2015, 31(4): 106-107.
- [ 11 ] HU D, CHEN J. Design of internal screw thread measuring device based on the Three-Line method principle [C]. Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, SPIE, 2010, 7544: 277-282.
- [ 12 ] FAN K, LIANG M. Development of an automatic cumulative-lead error measurement system for ballscrew nuts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4): 17-23.
- [ 13 ] 林家春, 滕辰, 李晗晓, 等. 基于粗糙度轮廓仪的圆柱齿轮齿廓形状偏差测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 15-22.  
LIN J CH, TENG CH, LI H X, et al. Measurement of shape deviation of cylindrical gear tooth profile based on roughness profiler [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 15-22.
- [ 14 ] YU J, YANG Y, CAI J, et al. Geometric error modeling of the contact probe in a three-dimensional screw thread measuring machine [J]. Measurement, 2022, 194: 111026.
- [ 15 ] 郝维娜, 令锋超, 刘志刚, 等. 轴承滚珠面型误差激光干涉测量系统的研究[J]. 西安交通大学学报, 2016,

50(6): 83-89.

HAO W N, LING F CH, LIU ZH G, et al. Research on laser interferometry system of bearing ball surface error [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 83-89.

- [16] 王瑞, 欧屹, 冯虎田, 等. 基于激光三角法的滚珠丝杠螺母内滚道型面检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(7): 82-85.

WANG R, OU Y, FENG H T, et al. Detection of inner raceway profile of ball screw nut based on laser triangulation method [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(7): 82-85.

- [17] 要义勇, 王旭, 赵丽萍. 一种面向滚珠螺母内滚道曲面的高精度光纤检测方法: CN104792276A [P]. 2015-07-22.

YAO Y Y, WANG X, ZHAO L P. A high-precision optical fiber detection method for inner raceway surface of ball nut: CN104792276A [P]. 2015-07-22.

- [18] 刘庆民, 王龙山, 陈向伟, 等. 滚珠丝杠副内螺纹的图像测量[J]. 中国机械工程, 2005(15): 1328-1331.

LIU Q M, WANG L SH, CHEN X W, et al. Image measurement of ball screw pair internal thread [J]. China Mechanical Engineering, 2005(15): 1328-1331.

- [19] DING W, WANG Q, ZHAO Y. Intelligent detection method for tapping omitting of internal thread based on computer vision[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2019, 32(3-4): 238-243.

- [20] SHENG Q, ZHENG J, SHI W, et al. Measurement and modeling of reflection characteristics of hole inner surface based on endoscopic image [J]. Measurement, 2022, 190: 110742.

- [21] 吴叶丽, 行鸿彦, 李瑾, 等. 改进阈值函数的小波去噪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 9-16.

WU Y L, XING H Y, LI J, et al. Wavelet denoising algorithm for improving threshold function[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 9-16.

## 作者简介



**高峰**, 1992年于西安理工大学获得学士学位, 1995年于西安理工大学获得硕士学位, 2001年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为数控装备控制及检测。

E-mail: gf2713@xaut.edu.cn

**Gao Feng** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Xi'an University of Technology in 1992, 1995, and 2001, respectively. He is currently a professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include CNC equipment control and detection.



**郑源**, 2021年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为测量与检测技术。

E-mail: 1583291348@qq.com

**Zheng Yuan** received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2021. He is currently a master student at Xi'an University of Technology. His main research interests include measurement and inspection technology.



**李艳** (通信作者), 1993年于西北农林科技大学获得学士学位, 1999年于西安理工大学获得硕士学位, 2005年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为移动机器人双目视觉定位。

E-mail: glatiagf12@163.com

**Li Yan** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 1993 from Northwest A&F University, received her M. Sc. degree in 1999 from Xi'an University of Technology, received her Ph. D. degree in 2005 from Xi'an Jiaotong University, now she is an associate professor in Xi'an University of Technology. Her main research interests include binocular vision localization of mobile robot.