

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108059

精密行星滚柱丝杠副行程误差影响因素试验研究*

郑伟^{1,2}, 祖莉^{1,2}, 王凯¹

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094; 2. 数控机床功能部件共性技术工业和信息化部重点实验室 张家港 215600)

摘要:行程误差是评价行星滚柱丝杠副精度的重要参数,但关于行程误差影响因素及建模的研究较少。因此,首先对行星滚柱丝杠副行程误差影响因素进行分析,包括加工误差、安装误差及变形误差;然后,基于各项误差转换建立行程误差模型并对各项误差进行测量;最后,使用行程误差试验台测量了4根行星滚柱丝杠副的丝杠行程误差和6种不同负载工况下的丝杠副行程误差。试验结果表明,加工工艺水平和安装精度对行程误差指标的影响较大,丝杠副行程误差随负载的增加而增加,表明负载增加产生的变形误差对行程误差的影响较大,丝杠行程误差试验值与模型计算值的相对误差为1.62%~4.37%,丝杠副的相对误差为1.81%~6.53%,验证了模型的有效性,可为进给系统传动精度的分析提供参考。

关键词:行星滚柱丝杠副;行程误差;误差分析;弹性变形

中图分类号: TH132.1 TH161 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.35

Experiment research on influence factors of travel error of planetary roller screw pair

Zheng Wei^{1,2}, Zu Li^{1,2}, Wang Kai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology for General Technology of Functional Parts of Numerical Control Machine, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: Travel error is an important parameter to evaluate the accuracy of planetary roller screw pair, but there are a few studies on the influencing factors and modeling of travel error. Therefore, firstly, the influencing factors of travel error of planetary roller screw pair are analyzed, including machining error, installation error and deformation error. Then, based on the error conversion, the travel error model is established and the errors are measured. Finally, the travel errors of four planetary roller screw pairs and the travel errors of planetary roller screw pairs under six different load conditions were measured with the travel error test bench. The test results show that the machining processing level and installation accuracy have a great influence on the travel error index, and the travel error of the screw pair increases with the increase of the load, which indicates that the deformation error caused by the increase of the load has a great influence on the travel error. The relative error between the test value of the screw travel error and the calculated value of the model is 1.62%~4.37%, and the relative error of the screw pair is 1.81%~6.53%. The effectiveness of the model is verified, the study can provide a reference for the transmission accuracy analysis of the feed system.

Keywords: planetary roller screw pair; travel error; error analysis; elastic deformation

0 引言

行星滚柱丝杠副是一种新型精密传动机构,它与滚

珠丝杠副的区别在于载荷传递元件为螺纹滚柱,在主丝杠周围均布了若干个滚柱,将电机的旋转运动转换为螺母的直线运动^[1-2]。行星滚柱丝杠副具有体积小、承载能力强、寿命长、精度高等优点^[3-4],且在高速度、高承载等

收稿日期:2021-06-07 Received Date: 2021-06-07

* 基金项目:国家科技重大专项(2018ZX04039001) 资助

极端工况下仍具有一定优势,故被广泛用于航空航天、武器装备、数控机床及精密仪器等领域^[5-7]。

行星滚柱丝杠副的行程误差是评价其传动性能的重要指标之一,分析行程误差是提高行星滚柱丝杠副精度的前提。行程误差是各种误差综合作用的结果,量化分析各误差不仅能计算丝杠行程误差,还能了解各误差对行程误差的影响程度。

李凯等^[8]从行星滚柱丝杠副自身误差、中间装置误差和环境因素引起的误差3个方面考虑,得到了各项误差因素对行程误差的影响程度,对各项误差因素进行综合得到了传动误差模型,但对丝杠加工误差考虑的不全面;汪佳丽^[9]从行程误差着手,分析各单项误差的来源,建立了综合误差的计算模型,并且求解出各个系统误差影响矩阵,以及影响系统误差的结构参数,提出减小误差的有效方法;文献^[10-11]从加工误差、装配误差等方面分析了误差来源,建立了考虑误差下的行程误差计算模型和考虑弹性变形的不同工作载荷下的误差模型,但未考虑丝杠在试验台上的安装误差及温度对行程误差的影响,且试验结果所考虑的行程误差指标较为单一;黄守县^[12]分析了行星滚柱丝杠副中滚柱与滚道间的接触变形对轴向总变形的影响,探讨了轴向变形对行程误差的影响,但没有考虑加工误差和安装误差,且没有进行试验验证。

综上所述,前人对行程误差的误差来源分析不够全面,对行程误差的研究缺乏合理的试验验证。因此,为准确预测标准式行星滚柱丝杠的行程误差,首先分析了加工误差、安装误差和变形误差,提出了行程误差计算模型,然后利用行程误差试验台测得4根27×10×5的标准型行星滚柱丝杠副各项行程误差指标,证明了行程误差计算模型的有效性。

1 误差分析

如图1所示为标准式行星滚柱丝杠副结构,其主要由丝杠、螺母、滚柱、内齿圈、行星支架和弹性挡圈组成,通过螺纹部件进行啮合传动。行星滚柱丝杠副行程误差是指螺母实际位移与理论位移之差。类似地,可通过行程误差试验台测量头与丝杠滚道接触的位置差来测量丝杠行程误差,且行星滚柱丝杠一般为多头螺纹,可以测得多个丝杠滚道的行程误差。丝杠、滚柱、螺母并不能视为纯刚体,在实际承载运行时会产生一定的弹性变形,从而影响螺母的实际运行位置。

1.1 加工及安装误差

受机床加工精度及加工过程中磨削力、磨削热等因素影响,行星滚柱丝杠滚道型面会与理论值存在误差,此误差主要体现在型面误差和偏心误差上。

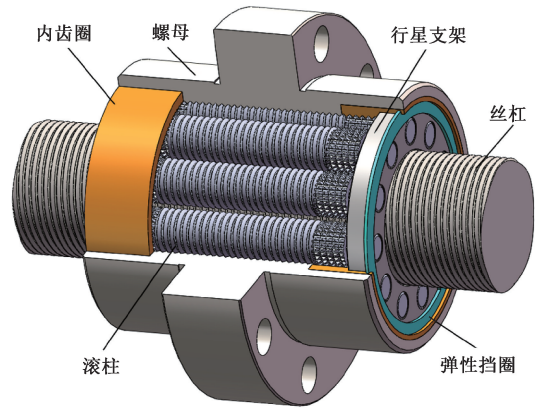


图1 行星滚柱丝杠副结构

Fig. 1 Structure of planetary roller screw pair

1) 型面误差

如图2所示,型面误差包括螺距误差、中径误差和牙型半角误差,其会导致螺纹牙的啮合点发生变化,产生行程误差,将其转化为轴向分量为:

$$\begin{cases} \Delta d_L = \Delta P_L \\ \Delta d_D = \frac{\Delta d}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \\ \Delta d_\alpha = H \sin \Delta \frac{\alpha}{2} / \cos^2 \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δd_L 、 Δd_D 、 Δd_α 分别为螺距误差、中径误差、牙型半角误差的轴向分量; H 为螺纹牙顶高。

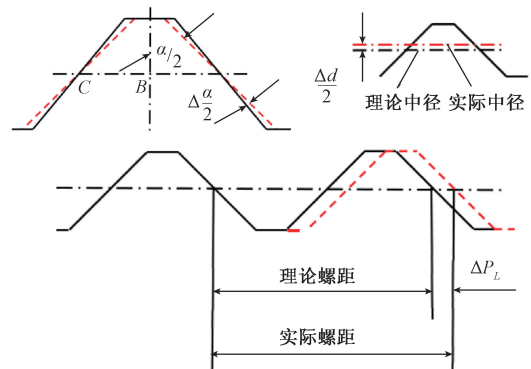


图2 型面误差

Fig. 2 Profile error

2) 偏心误差

如图3所示,偏心误差为螺纹轴线与轴颈轴线的偏差,螺旋线在轴向截面上的投影是正弦曲线,当丝杠绕轴旋转时,投影的正弦曲线将沿轴向移动。由于轴线偏心,螺母会从原始位置稍微向前或向后移动,即在轴向产生行程误差,可通过两正弦曲线与Z轴交点间的距离表示行程误差,由偏心误差引起的行程曲线表示为 x_e ,且偏心误差

为周期性误差,其是产生行程误差曲线波动的根本原因。

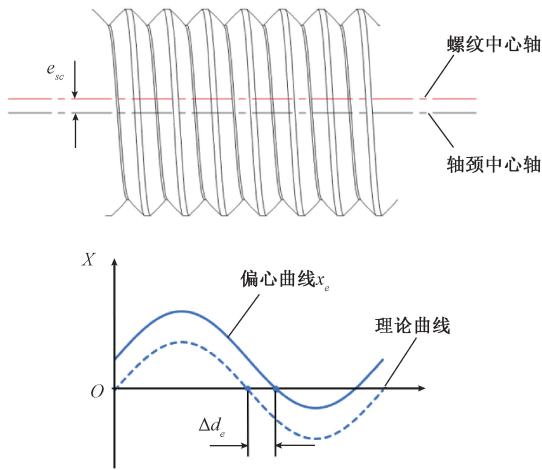


图3 偏心误差
Fig. 3 Eccentric error

当 $x_e=0$ 时,表示 Z 方向的当前行程,与理论导程的差可视为由偏心误差引起的行程误差:

$$\begin{cases} x_e = \frac{d_s}{2} \cdot \sin(z \cdot 2\pi/P_h) + \frac{e_{sc}(d_s + \delta_r + \Delta d_D)}{d_s + \Delta d_D} \cdot \sin\theta_s \\ \Delta d_e = z \Big|_{x_e=0} - P_h \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_s 为丝杠中径, P_h 为丝杠导程。

3) 倾斜安装误差

行星滚柱丝杠副在实际安装中,两端顶尖高度可能存在不一致,导致丝杠倾斜安装,但螺母与工作台连接仍是水平的,则丝杠轴线与螺母轴线存在夹角 $\Delta\gamma$ 。

如图4所示,可将坐标系 OXZ 通过平移变换和旋转变换得到误差坐标系 $O'X'Z'$ 。

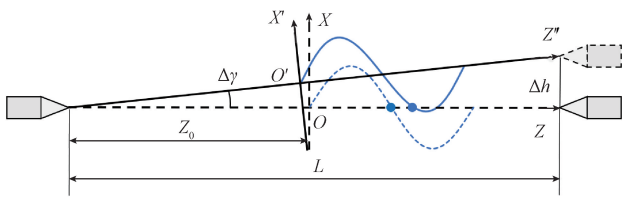


图4 丝杠倾斜安装误差
Fig. 4 Screw tilt installation error

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} Z' \\ X' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\gamma & -\sin\Delta\gamma \\ \sin\Delta\gamma & \cos\Delta\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z - Z_0 \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \Delta\gamma = \arctan \frac{\Delta h}{L} \end{cases} \quad (3)$$

随着丝杠转动,可以获得两曲线与 Z 轴之间的交点坐标,一个周期内实际行程与导程之间的差即为行程误差:

$$\delta_{in} = Z' \Big|_{x'=0} - P_h \quad (4)$$

4) 支撑单元顶升误差

如图5所示,行星滚柱丝杠副受到重力作用产生一

定挠度,由丝杠、螺母重力产生的挠度 δ_{gs} 、 δ_{gn} 为:

$$\begin{cases} \delta_{gs} = \frac{1}{E_s I} \left(\frac{1}{24} q z^4 - \frac{1}{12} q l z^3 + \frac{1}{24} q l^3 z \right) \\ \delta_{gn} = \frac{1}{E_s I} \left(\frac{1}{12l} P z^4 - \frac{1}{6} P z^3 + \frac{1}{12} P l^2 z \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_s 为丝杠弹性模量, I 为丝杠截面对中性轴的惯性矩, q 为丝杠自重产生的均布载荷, P 为螺母重力, l 为丝杠长度。

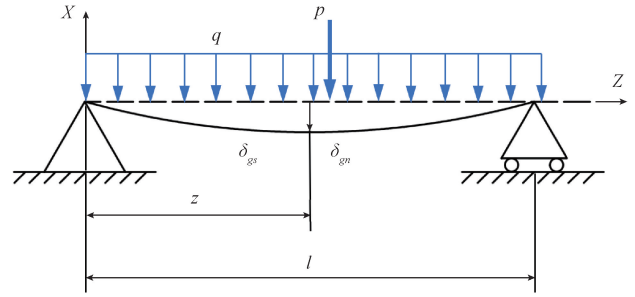


图5 丝杠副挠度

Fig. 5 Screw pair deflection

如图6所示,试验时会用支撑单元顶住丝杠或螺母以抵消挠度,但支撑单元顶升变形量不能精准抵消挠度,所以丝杠仍具有一定径向变形量 δ_s 。

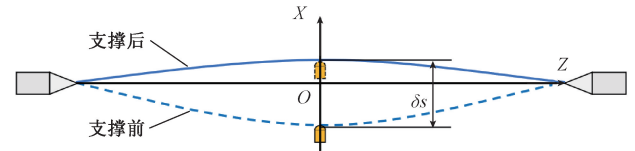


图6 支撑单元顶升误差

Fig. 6 Support unit lifting error

测量丝杠行程误差和丝杠副行程误差时,由重力和支撑单元共同作用的行程曲线及行程误差表示为:

$$\begin{cases} x_s = \frac{d_s}{2} \cdot \sin(z \cdot 2\pi/P_h) + (\delta_{gs} - \delta_s) \sin(z \cdot 2\pi/2L) \\ x_p = \frac{d_s}{2} \cdot \sin(z \cdot 2\pi/P_h) + (\delta_{gs} + \delta_{gn} - \delta_s) \sin(z \cdot 2\pi/2L) \\ \delta_s = Z_s \Big|_{x_s=0} - P_h \\ \delta_p = Z \Big|_{x_p=0} - P_h \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为有效行程。

1.2 变形误差

1) 热变形误差

行星滚柱丝杠副在运转时会因摩擦力的作用产生热量,出现轴向和径向的热变形误差,根据徐阳等^[13]所

述温升理论,可得温升导致丝杠在轴向和径向的热变形量为:

$$\begin{cases} \delta y_z = \rho \cdot \Delta T \cdot L \\ \delta y_r = \rho \cdot \Delta T \cdot d_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: δy_z 为轴向变形, δy_r 为径向变形, ρ 为材料热膨胀系数, ΔT 为温升。

2) 弹性变形误差

如图 7 所示,行星滚柱丝杠副在负载工况下会发生轴向拉压变形 ΔL_F 和扭转变形 ΔL_T ,二者结合可得弹性变形误差 ΔL_{FT} :

$$\begin{cases} \Delta L_{FT} = \frac{4Fz}{\pi d_s^2} \left(\frac{1}{E_s} + \frac{2P_h^2}{\pi^2 d_s^2 G \eta} \right) \\ \Delta L_F = \frac{4Fz}{\pi E_s d_s^2} \\ \Delta L_T = \frac{8FzP_h^2}{\pi^3 d_s^4 G \eta} \end{cases} \quad (8)$$

式中: F 为丝杠受到的轴向力, z 为螺母到固定端的距离, E_s 为弹性模量, G 为剪切模量, η 为传动效率。

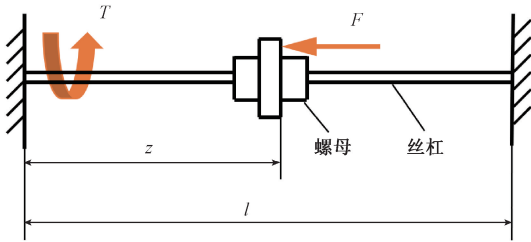


图 7 丝杠受力示意图

Fig. 7 Screw force schematic diagram

3) 承载变形误差

如图 8 所示,在只考虑弹性变形的条件下,行星滚柱丝杠在受轴向载荷作用下会发生轴段变形、接触变形和螺纹牙变形。

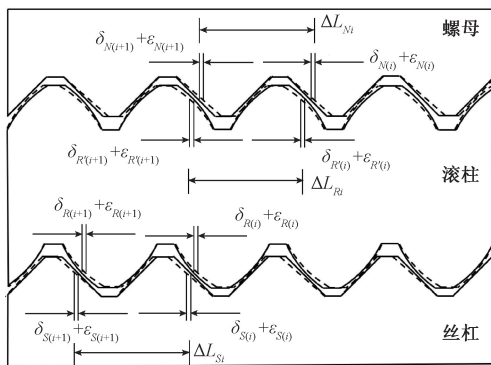


图 8 承载变形

Fig. 8 Loading deformation

ΔL_{Si} 、 ΔL_{Ni} 、 ΔL_{Ri} 分别表示丝杠、螺母及滚柱轴段基体的拉压变形; δ_k 和 ϵ_k ($k=S, N, R, R'$) 分别表示丝杠、螺母、滚柱丝杠侧及滚柱螺母侧的接触变形和螺纹牙变形在轴向上的分量。

结合 Ma 等^[14]的载荷分布模型,轴段变形 Δl_{ji} 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta l_{ji} = \frac{F_{ji} P_h}{E_j A_j}, j=S, N, R \\ \sum_{i=1}^m N_{ji} \cos \lambda \sin \beta = F/n \\ N_{i-1}^{2/3} = N_i^{2/3} + \frac{n P_h (A_S + A_N)}{8 K E_j A_S A_N} \cdot \cos^2 \lambda \cdot \sin^2 \beta \cdot \sum_{k=i}^m N_k, i=2, 3, \dots, m \\ F_{ji} = N_{ji} \cos \lambda \sin \beta \end{cases} \quad (9)$$

式中: $j=S, N, R$ 时分别表示丝杠、螺母和滚柱; N_{ji} 为零件 j 第 i 个螺纹牙所受法向力; β 为接触角; λ 为丝杠螺旋升角; m 为螺纹牙数; n 为滚柱数; F_{ji} 为零件 j 第 i 个螺纹牙所受轴向力; E_j 为弹性模量; A_j 为横截面积。

行星滚柱丝杠副承载后,各零件螺纹牙受力后都将发生沿轴线方向的弹性变形,根据山本晃^[15]的理论,将螺纹牙参数代入计算并化简得螺纹牙变形 ϵ_{ji} :

$$\epsilon_{ji} = K \cdot F_{ji} \quad (10)$$

式中: K 为螺纹牙刚度。

相互点接触的两弹性体在外载荷作用下,其接触点将发生形变,根据赫兹接触理论及刘佳等^[16]的理论,两螺纹牙间的接触变形量 δ_{ji} 为:

$$\delta_{ji} = G(\Sigma \rho) \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{8} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^2 F_{ji}^2 \Sigma \rho} \quad (11)$$

式中: $\Sigma \rho$ 为两接触面的主曲率之和; $G(\Sigma \rho)$ 是关于 $\Sigma \rho$ 的函数; E_1, E_2, ν_1, ν_2 分别为两接触体的弹性模量和泊松比。

则承载端总轴向变形为:

$$\Delta L_m = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta l_{ji} + \sum_{i=1}^m \epsilon_{ji} + \sum_{i=1}^m \delta_{ji}, j=S, N, R \quad (12)$$

2 行程误差建模

行星滚柱丝杠副的行程误差受到多种因素影响,周期性误差是多个谐波误差的组合,主要有机床加工误差导致的螺纹误差、偏心误差等,周期性误差可表示为多个正弦函数的代数和:

$$\delta_r(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (13)$$

偶然误差是由工件表面缺陷或外部振动对精磨过程产生干扰引起的,可以表示为:

$$\delta_A \sim N(0, \sigma^2) \quad (14)$$

温度变化对丝杠的行程误差也会产生很大影响,热变形误差近似为线性,可以表示为:

$$\delta_c(t) = a + bt \tag{15}$$

2.1 丝杠行程误差模型

对沿着轴向、径向和法向产生的各项误差单独分析,考虑到行程误差是分析丝杠在轴向的传动精度,因此将各误差转换到轴向方向,然后相加。具体而言,螺距误差直接体现在轴向;牙型角误差由径向转换到轴向;偏心误差转换到测量头在轴向的行程误差;顶升误差由径向转换到轴向;中径误差和倾斜误差要在偏心误差的基础上进行分析;热变形误差方向为轴向和径向,其轴向热伸长直接体现在轴向误差,径向热伸长体现在偏心误差的影响。因此,经过分析各项误差之间的耦合关系,将各项误差统一转换到轴向方向再进行代数和,得出计算模型如下:

$$E_{ps} = \Delta d_L + \Delta d_D + \Delta d_\alpha + \Delta d_e + \delta_m + \delta_s + \delta y_z \tag{16}$$

如图9所示,运用最小二乘法拟合出一条直线近似代替行程误差曲线,从而计算出有效行程内的平均行程偏差, T 为有效行程内的温度补偿。

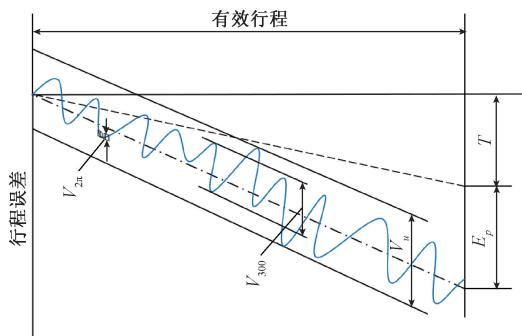


图9 行程误差曲线
Fig. 9 Travel error curve

其中, E_p 为全程的行程偏差, $V_{2\pi}$ 为 2π 弧度内的行程变动量, V_u 为有效行程内的行程变动量^[17]。

$$\begin{cases} E_p = a + b\theta \\ a = \frac{\sum \theta_i^2 \sum E_i - \sum \theta_i \sum \theta_i E_i}{N \sum \theta_i^2 - \sum \theta_i \sum \theta_i} \\ b = \frac{N \sum \theta_i E_i - \sum \theta_i \sum E_i}{N \sum \theta_i^2 - \sum \theta_i \sum \theta_i} \end{cases} \tag{17}$$

式中: θ 为旋转角度, θ_i 和 E_i 分别为第 i 个测量位置的旋转角度和行程偏差, N 为测量点个数。

2.2 丝杠副行程误差模型

在测量丝杠副行程误差时,需要考虑滚柱、丝杠和螺母螺纹牙之间的变形,结合丝杠的误差分析,丝杠副行程误差须综合考虑加工误差、安装误差和变形误差的影响。

因此,行星滚柱丝杠副的行程误差计算模型如下:

$$E_{PM} = \Delta d_L + \Delta d_D + \Delta d_\alpha + \Delta d_e + \delta_m + \delta_p + \delta y_z + \Delta L_{FT} + \Delta L_m \tag{18}$$

3 行星滚柱丝杠误差测量

3.1 加工误差测量

如图10所示为丝杠滚道型面检测试验台,该试验台由头尾架、转台、位移平台、电机、光幕式传感器及光栅尺组成。安装好待测丝杠后,将转台旋转等于丝杠螺旋升角的角度,位移平台带动光幕式传感器轴向移动,测量出丝杠母线的法向轮廓坐标,再通过软件计算出行星滚柱丝杠的滚道型面参数,将其与理论丝杠参数进行对比得到丝杠加工误差,行星滚柱丝杠副结构参数和滚道加工误差分别如表1、2所示。

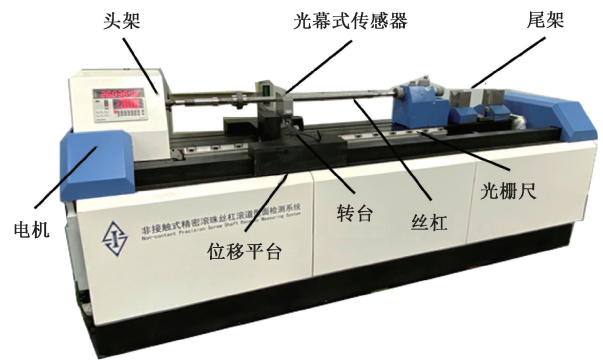


图10 丝杠滚道型面误差试验台
Fig. 10 Screw raceway surface error test bench

表1 行星滚柱丝杠副结构参数

Table 1 Structural parameters of planetary roller screw pair

参数	螺距 /mm	头数 /mm	导程 /mm	中径 /mm	牙型半角/(°)
丝杠	2	5	10	27	90
滚柱	2	1	2	9	90
螺母	2	5	10	45	90

表2 滚道加工误差

Table 2 Raceway machining error

丝杠序号	螺距误差/ μm	中径误差/mm	牙型半角误差/(°)
1	0.18	0.001	0.12
2	0.12	0.001	0.15
3	0.35	0.003	0.23
4	0.31	0.003	0.19

3.2 安装误差测量

如图 11 所示,通过千分表在试验台上对偏心误差、倾斜误差及顶升误差进行测量,丝杠通过中心孔安装在试验台两端顶尖上,千分表在试验平台上进行移动。

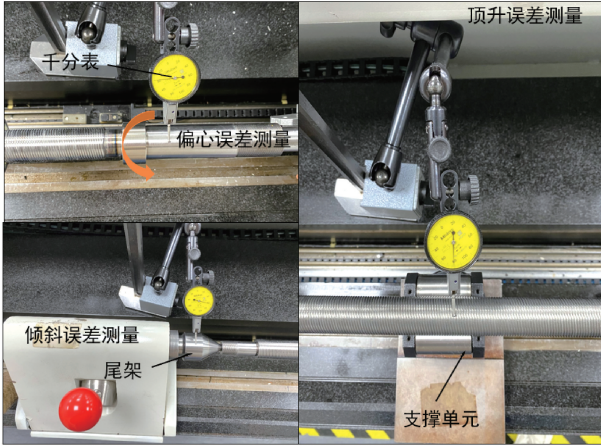


图 11 安装误差测量

Fig. 11 Installation error measurement

1) 测量偏心误差时,先将千分表探头与丝杠轴的外圆保持一定量的接触,然后驱动丝杠以 10 r/min 的转速运动,最后将丝杠旋转时千分表最大读数与最小读数之差的 1/2 作为偏心误差,测量 3 次取平均值作为最终偏心误差。

2) 测量倾斜误差时,先将千分表探头与头部顶尖的外圆保持一定量的接触,然后沿轴向移动千分表至尾部顶尖的外圆上,读出头尾架高度,测量 3 次取平均值。

3) 测量顶升误差时,在使用支撑单元克服丝杠的自重误差后,将千分表探头与丝杠有效长度内的螺纹牙顶部接触,读出端部和中部的示数差,测量 3 次取平均值。

安装误差测量结果如表 3 所示。

表 3 安装误差测量结果

Table 3 Installation error measurement result μm

测量指标	丝杠 1	丝杠 2	丝杠 3	丝杠 4
偏心误差	10	8	11	72.61
倾斜误差	12	12	12	12
顶升误差	8	6	13	26

4 试验研究

4.1 行程误差试验

为验证行程误差模型的有效性,通过行程误差试验台测量 PRSM 行程误差各指标。如图 12 所示为行程误

差试验台,该试验台由电机、头尾架、气浮工作平台、支撑单元、圆光栅及激光位移传感器组成。丝杠由头架和尾架安装,试验时电机以 20 r/min 驱动丝杠转动,圆光栅测量角位移;测量丝杠行程误差时,选择与丝杠滚道相贴合的球形测量头,测量丝杠副行程误差时,将螺母与工作台连接,螺母带动气浮工作平台进行无摩擦轴向移动,激光位移传感器测量气浮工作平台实际位移。

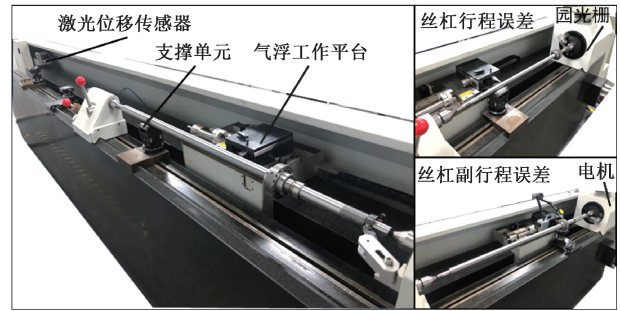


图 12 行程误差试验台

Fig. 12 Travel error test bench

行程误差为实际轴向位移与理论轴向位移之差,理论轴向位移通过角位移计算得出,行程误差曲线及行程误差各指标通过试验台软件处理获得,对于行程误差曲线,横坐标 X 是测得的轴向行程,纵坐标 Y 是实际行程与理论行程之间的差:

$$\begin{cases} X = x \\ Y = x - \frac{\theta_s}{2\pi} P \end{cases} \quad (19)$$

测试样件选用 4 根型号为 27×10×5 的标准式行星滚柱丝杠副,均来自不同厂家,加工工艺有所不同。试验前将丝杠放在温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 的环境条件下足够长时间 ($\geq 2 \text{ h}$) 以确保丝杠热平衡,然后测量丝杠及丝杠副的行程误差,丝杠表面温度为 20.9°C 。

4.2 试验结果分析

对 4 根同规格行星滚柱丝杠副进行试验,每根样件均进行 3 次测试后取平均值作为最终的试验数据,其试验数据如表 4、5 所示,表 4 为 4 根测试样件的行程误差指标试验数据,表 5 为单根丝杠各滚道的行程误差指标试验数据,可以看出不同厂家的丝杠行程误差指标差异较大,说明不同厂家的加工工艺水平或工艺参数的不同导致了加工误差各不相同;每根丝杠的 5 个滚道行程误差指标差异较小,说明在加工丝杠滚道时对每个滚道加工工序较为严格,一致性较好,这样在装配好后能保证丝杠各个滚道均与滚柱保持良好接触,使丝杠副具有较优异的传动性能。

表4 4根丝杠行程误差最差指标试验数据

Table 4 Test data of the worst travel error index of four screws μm

丝杠	E_p		$V_{2\pi}$		V_u	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算
1	22.44	21.91	3.75	3.66	9.45	9.16
2	18.67	17.15	2.68	2.47	6.45	6.01
3	35.24	33.15	3.77	3.49	9.37	8.63
4	31.69	29.95	25.75	23.88	41.06	38.05

表5 各滚道行程误差指标试验数据

Table 5 Test data of various raceway travel error indexes μm

滚道	E_p		$V_{2\pi}$		V_u	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算
S1	22.44	21.91	3.75	3.66	9.45	9.16
S2	22.82	22.09	3.65	3.54	8.93	8.68
S3	22.63	22.01	3.81	3.71	9.31	8.95
S4	22.27	21.91	3.76	3.62	9.38	8.96
S5	22.18	21.74	3.69	3.59	9.27	8.94

如图13所示为4根样件所有滚道的最差丝杠行程误差指标试验值与模型计算值的对比,可以看出样件1、2的加工精度达到了要求,工艺水平较好,样件3、4的部分指标未达到精度要求,这是因为其加工误差较大导致的,所以4根丝杠的工艺质量水平依次为样件2>1>3>4;如图14所示为5个滚道的丝杠行程误差指标试验值与模型计算值对比,可以看出丝杠5个滚道的各项行程误差指标一致性较好,说明厂家在加工丝杠滚道时,对丝杠5个滚道的分头度数精准,滚道磨削工艺水平较高。

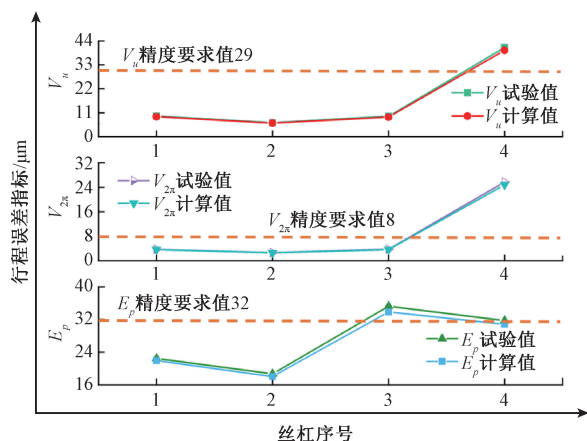


图13 4根丝杠行程误差最差指标对比

Fig. 13 Comparison of four screw travel error worst indexes

表6为丝杠行程误差各指标试验值与模型计算值的相对误差, E_p 的相对误差在 2.36% ~ 3.94%, $V_{2\pi}$ 的相对

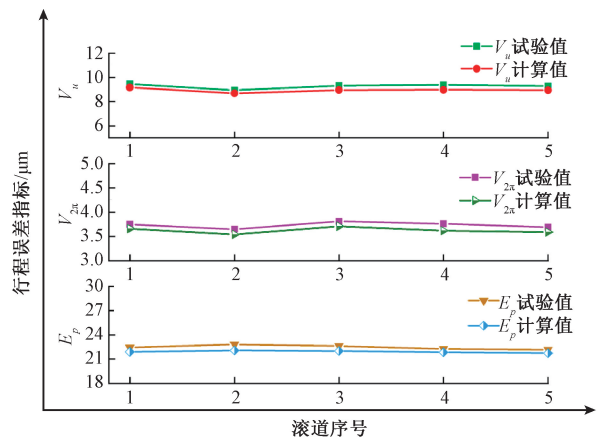


图14 各滚道行程误差指标对比

Fig. 14 Comparison of various raceway travel error indexes

误差在 2.38% ~ 3.61%, V_u 相对误差在 2.48% ~ 3.63%; 表7为滚道行程误差各指标试验值与模型计算值的相对误差, E_p 的相对误差在 1.62% ~ 3.20%, $V_{2\pi}$ 的相对误差在 2.40% ~ 3.72%, V_u 相对误差在 2.81% ~ 4.37%, 说明本文所提出的行程误差模型具有有效性且对各单项误差的测量及计算具有准确性。

表6 丝杠行程误差各指标相对误差

Table 6 Relative error of various indexes of screw travel error %

丝杠序号	E_p	$V_{2\pi}$	V_u
1	2.36	2.40	3.07
2	3.48	3.36	2.48
3	3.94	2.38	3.63
4	2.77	3.61	3.39

表7 各滚道行程误差各指标相对误差

Table 7 Relative errors of various indexes of raceway travel errors %

滚道序号	E_p	$V_{2\pi}$	V_u
S1	2.36	2.40	3.07
S2	3.20	3.01	2.81
S3	2.74	2.63	3.87
S4	1.62	3.72	4.37
S5	1.98	2.71	3.56

行程误差指标 E_p 和 V_u 是由多种误差共同决定的, 没有单一误差占据主导, 而 $V_{2\pi}$ 反映的是一个周期内的行程变动量, 其只受到周期性误差的影响, 由 1.1 节的误差分析可知, 周期性误差包括偏心误差、倾斜误差和顶升误差, 中径误差和热变形误差也会对偏心误差产生影响, 如表8所示, 由误差测量值计算出5种误差对 $V_{2\pi}$ 的影

响,得出偏心误差对 $V_{2\pi}$ 的影响较大,中径误差对 $V_{2\pi}$ 无显著影响。

表 8 行程变动量 $V_{2\pi}$ 影响因素分析

Table 8 Analysis of influence factors of travel variation $V_{2\pi}$ μm

丝杠	$V_{2\pi}$					
	总	中径误差	偏心误差	倾斜误差	顶升误差	温升误差
1	3.66	0.14	1.84	0.51	0.72	0.45
2	2.48	0.11	1.07	0.51	0.34	0.45
3	3.49	0.24	1.96	0.51	0.33	0.45
4	23.88	0.33	20.73	0.51	1.86	0.45

为研究不同负载工况下丝杠副行程误差的变化情况,分别以 3、6、9、12、15 及 18 kN 的负载进行丝杠副行程误差试验,加载后行星滚柱丝杠副内部的摩擦力加大,导致丝杠副的产生一定温升,经过测量得该温度为 20.9℃~24.3℃,经过温度补偿后,试验数据和模型计算值如表 9 所示。

表 9 丝杠副行程误差试验数据

Table 9 Test data of screw pair travel error μm

负载/kN	E_p		$V_{2\pi}$		V_u	
	试验	计算	试验	计算	试验	计算
0	27.73	25.92	8.15	7.89	15.10	14.46
3	36.58	35.13	7.92	7.70	14.34	13.89
6	42.65	41.07	8.14	7.93	14.33	13.74
9	48.72	47.02	8.06	7.76	14.65	14.13
12	54.83	53.29	7.98	7.72	14.44	13.98
15	61.02	59.54	8.13	7.79	14.52	14.09
18	67.44	66.22	8.09	7.86	14.29	13.75

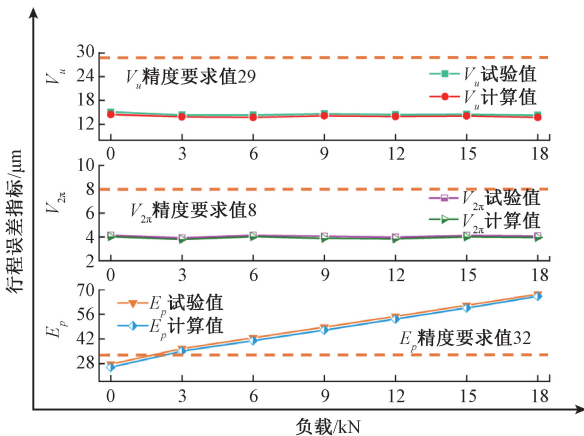
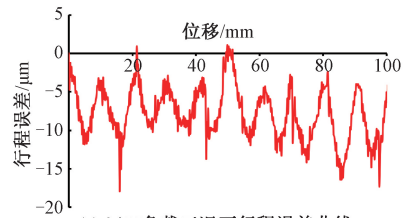


图 15 不同负载工况行程误差指标对比

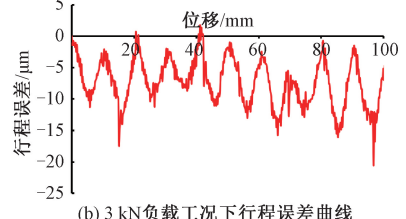
Fig. 15 Comparison of travel error indexes under different load conditions

如图 15 所示为丝杠副行程误差各指标试验值与模型计算值对比,可以看出丝杠副在承载后行程偏差 E_p 不断增大,且承载后行程误差值显著大于不承载时行程误差值,说明丝杠副承载后发生的变形误差对行程误差的影响程度要大于加工及安装误差的影响。随着负载的增大,行程变动量 $V_{2\pi}$ 、 V_u 保持稳定趋势,说明二者不随负载的变化而变化。

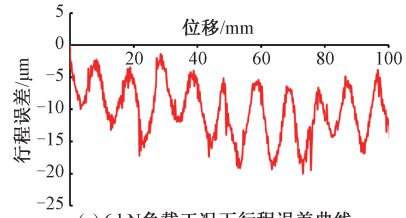
图 16 为不同负载工况下行程误差曲线,由图 16 可知,随着负载的不断增大,行程误差不断增大;全程曲线上有毛刺存在,行程变动量较大,这是丝杠副内部的各个滚柱、行星支架加工工艺水平存在不一致且装配时每个滚柱存在不均匀装配导致的,说明丝杠副的行程误差同各零件的加工工艺水平和装配水平紧密相关;随着



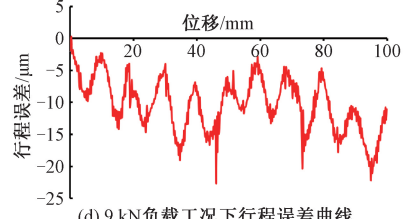
(a) 0 kN 负载工况下行程误差曲线
(a) Travel error curve under 0 kN load condition



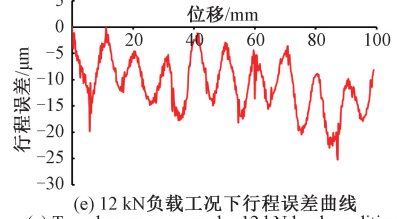
(b) 3 kN 负载工况下行程误差曲线
(b) Travel error curve under 3 kN load condition



(c) 6 kN 负载工况下行程误差曲线
(c) Travel error curve under 6 kN load condition



(d) 9 kN 负载工况下行程误差曲线
(d) Travel error curve under 9 kN load condition



(e) 12 kN 负载工况下行程误差曲线
(e) Travel error curve under 12 kN load condition

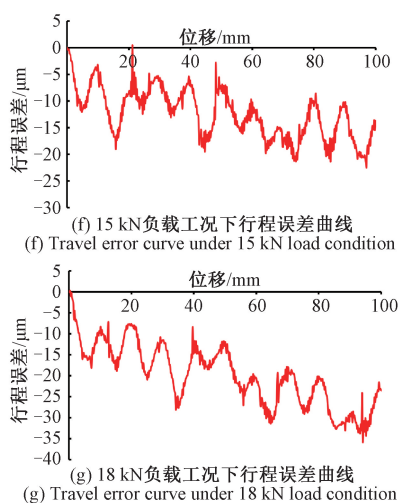


图 16 不同负载工况行程误差曲线

Fig. 16 Travel error curves under different load conditions

负载的不断增大,变形误差逐渐增大,导致行程误差不断增大。

表 10 为不同负载工况下行程误差试验值与模型计算值的相对误差,在 0~18 kN 的负载内,随着负载的增大, E_p 相对误差不断减小,其相对误差为 1.81%~6.53%, $V_{2\pi}$ 和 V_u 的相对误差分别为 2.66%~4.19% 和 2.96%~4.24%。由于还有一定的环境及系统误差存在,所以各指标的试验值均大于模型计算值,且相对误差较小,验证了行程误差计算模型的有效性。

表 10 不同负载工况行程误差指标相对误差

Table 10 Relative errors of travel error indexes under different load conditions %

负载/kN	E_p	$V_{2\pi}$	V_u
0	6.53	3.13	4.24
3	3.96	2.81	3.14
6	3.70	2.66	4.12
9	3.49	4.19	3.55
12	2.81	3.27	3.19
15	2.43	2.91	2.96
18	1.81	2.93	3.78

5 结 论

本文通过分析行星滚柱丝杠副加工误差、安装误差及变形误差,提出了丝杠和丝杠副行程误差计算模型。在对误差进行测量后,通过行程误差模型计算出行程误差计算值,再将其与行程误差试验值进行对比,得出如下结论。

1) 通过比较 4 根不同厂家的行星滚柱丝杠副加工误差及行程误差指标试验值可知,丝杠的加工误差直接影响行程误差指标,其中偏心误差对行程误差指标 $V_{2\pi}$ 的影响较大,中径误差对行程误差指标 $V_{2\pi}$ 无显著影响,因此加工工艺水平对行星滚柱丝杠副的行程误差指标有着重要影响;

2) 通过对比行程误差的模型计算值和试验值,可得试验值要大于模型计算值,这是由测量系统误差及环境因素导致的,丝杠行程误差模型计算值与试验值相对误差在 1.62%~4.37%,丝杠副行程误差模型计算值与试验值相对误差在 1.81%~6.53%,说明本文提出的计算模型准确性和适用性较好,可为行星滚柱丝杠副的行程误差估算提供参考;

3) 丝杠 5 个滚道的行程误差指标试验值 E_p 、 $V_{2\pi}$ 、 V_u 的值较为接近,说明测试样件每个滚道的加工一致性较好,且通过比较丝杠和丝杠副的行程误差各指标,可得丝杠的行程误差指标要优于丝杠副,这是丝杠副受到装配、支撑单元位置变化、接触变形等因素影响,导致其行程误差较大;

4) 丝杠副在不同负载工况下运行时,随着负载的不断增大,行程偏差 E_p 不断增大,这是由于发生了明显的弹性变形导致的,在不加载情况下,试验值与模型计算值的相对误差达到了 6.53%,加载后试验值与模型计算值的相对误差在 1.81%~3.96%,表明当载荷不断增加时,弹性变形对行程误差的影响大于加工误差和安装误差的影响。

参考文献

- [1] 肖正义. 行星滚柱丝杠副的研究[J]. 制造技术与机床, 2019(1): 36-39.
XIAO ZH Y. Research on planetary roller screw pair[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(1): 36-39.
- [2] 董永, 刘更, 马尚君, 等. 行星滚柱丝杠副滚柱的设计方法与虚拟装配[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 53-58.
DONG Y, LIU G, MA SH J, et al. Design and modeling of rollers of planetary roller screw [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(8): 53-58.
- [3] 马尚君, 刘更, 佟瑞庭, 等. 考虑滚柱节圆偏移的反向式行星滚柱丝杠副运动学分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(11): 1421-1426.

- MA SH J, LIU G, TONG R T, et al. Kinematic analysis of an inverted planetary roller screw considering roller pitch circle mismatch [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(11): 1421-1426.
- [4] 郭嘉楠, 何鹏, 黄洪雁, 等. 行星滚柱丝杠副刚度特性分析及试验验证[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(5): 967-973.
- GUO J N, HE P, HUANG H Y, et al. Analysis of planetary roller screw axial stiffness and experiment study[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(5): 967-973.
- [5] GARCIA A, CUSIDO J, ROSERO J A, et al. Reliable electro mechanical actuators in aircraft [J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 2008, 23(8): 19-25.
- [6] 赵小惠, 张梦洋, 石杨斌, 等. 改进 CEEMDAN 算法的电机轴承振动信号降噪分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(12): 159-164.
- ZHAO X H, ZHANG M Y, SHI Y B, et al. Noise reduction analysis of motor bearing vibration signal based on improved CEEMDAN algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2020, 34(12): 159-164.
- [7] WANG H, TONG M H, ZHENG P. Research on contact strength between roller screw pair on hoisting mechanism applied in deep sea crane [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2001-2005.
- [8] 李凯, 叶佩青, 周晓尧, 等. 精密行星滚柱丝杠的传动特性[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1908-1916.
- LI K, YE P Q, ZHOU X Y, et al. Transmission characteristics of precise planetary roller screw [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1908-1916.
- [9] 汪佳丽. 行星滚柱丝杠副传动特性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- WANG J L. The transmission characteristics research on planetary roller screw pair [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [10] MA SH J, CAI W, WU L P, et al. Modelling of transmission accuracy of a planetary roller screw mechanism considering errors and elastic deformations [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 134: 151-168.
- [11] FU X J, LIU G, MA SH J, et al. Kinematics model of planetary roller screw mechanism with run-out and position errors [J]. *Asme Journal of Mechanical Design*, 2018, 140(1): 032301.
- [12] 黄守县. 混合陶瓷行星滚柱丝杠副的定位精度及传动效率研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- HUANG SH X. Research on positioning accuracy and transmission efficiency of hybrid ceramic planetary roller screw pair [D]. QinHuangdao: Yanshan University, 2019.
- [13] 徐阳阳, 祖莉, 汪远远, 等. 滚珠丝杠副热变形模型理论分析及其对定位精度影响的试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(1): 1-3, 7.
- XU Y Y, ZU L, WANG Y Y, et al. Theoretical analysis and experimental study of thermal deformation model of ball screw and its influence on positioning accuracy [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(1): 1-3, 7.
- [14] MA SH J, LIU G, TONG R T, et al. A frictional heat model of planetary roller screw mechanism considering load distribution [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2015, 43(2): 164-182.
- [15] 山本晃. 螺纹连接的理论与计算[M]. 郭可谦, 高素娟, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984: 50-120.
- SHANBEN H. Theory and calculation of thread connection [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1984: 50-120.
- [16] 刘佳, 彭航, 罗英, 等. 行星滚柱丝杠传动副基于 Hertz 接触理论的接触模型研究[J]. *核动力工程*, 2020, 41(1): 185-188.
- LIU J, PENG H, LUO Y, et al. Research on contact model of planetary roller screw drive pair based on Hertz contact theory [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(1): 185-188.
- [17] 林炜国, 祖莉, 冯虎田, 等. 滚珠丝杠副精度保持性评估试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 196-205.

LIN W G, ZU L, FENG H T, et al. Experimental study on the evaluation of ball screw accuracy maintenance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 196-205.

作者简介



郑伟, 2019 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学研究生, 主要研究方向为机械电子工程与精密检测技术。

E-mail: 1042802154@qq.com

Zheng Wei received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2019. Now, he is a master student in Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes mechatronic engineering and precision testing technology.



祖莉 (通信作者), 1999 年于苏州大学获得学士学位, 2004 年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为数控机床滚动功能部件的性能研究和测量以及伺服系统精密驱动的设计和应用。

E-mail: zuli@njust.edu.cn

Zu Li (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Soochow University in 1999 and received her Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2004. She is currently a professor and master student supervisor at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interest includes performance research and measurement of rolling functional components of CNC machine tools, design and application of precision drive of servo system.