

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108382

滚珠丝杠副关键加工尺寸误差与预紧转矩关系研究*

刘东, 祖莉, 林炜国

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要: 预紧转矩是决定滚珠丝杠副可靠性的重要影响因素, 目前预紧转矩的计算主要依据经验公式, 理论计算值与实际预紧转矩值误差较大。为了准确计算滚珠丝杠副的预紧转矩, 基于接触变形和载荷分布理论, 分析关键加工尺寸误差对预紧转矩的影响, 建立中径误差、导程误差与滚珠丝杠副预紧转矩关系模型。利用滚珠丝杠副导程误差、型面检测试验台测量不同型号丝杠副的导程误差、中径值, 通过导程误差、中径误差计算滚珠丝杠副的预紧转矩理论值。利用滚珠丝杠副预紧转矩试验台测量预紧转矩实际值, 测量结果表明预紧转矩的理论计算值与试验值的相对误差为 0.65%~12.18%, 均小于前人模型的 15.07%~43.57%, 理论模型与实际预紧转矩的一致性较好, 验证理论模型的正确性。

关键词: 滚珠丝杠副; 关键加工尺寸误差; 预紧转矩; 中径误差; 导程误差

中图分类号: TH161 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on relationship between key machining dimensional error and preload torque of ball screw

Liu Dong, Zu Li, Lin Weiguo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The preload torque is an important factor that affects the reliability of the ball screw. At present, the calculation of preload torque is mainly based on the empirical formula. There is a large error between the theoretical calculation value and the actual preload torque value. To calculate the preload torque of the ball screw accurately, based on the contact deformation and load distribution theory, the influence of key machining dimensional errors on the preload torque is analyzed. The relationship model among pitch diameter error, lead error and preload torque of ball screw is formulated. The lead error and pitch diameter of different types of ball screws are measured by the ball screw lead error and the profile detection test bench. The theoretical value of preload torque of ball screw is calculated through the lead error and pitch diameter error. The actual value of preload torque is measured by the preload torque test-bed of ball screw. The measurement results show that the relative error between the theoretical calculation value of preload torque and the test value is 0.65%~12.18%, which is less than 15.07%~45.57% of the existing models. The consistency between the theoretical model and the actual friction torque is accurate. The correctness of the theoretical model is verified.

Keywords: ball screw; key machining dimensional errors; preload torque; pitch diameter error; lead error

0 引言

滚珠丝杠副作为高档数控机床的核心功能部件, 直接决定了机床的加工精度。通过调节滚珠丝杠副的预紧转矩可以消除其反向间隙, 提高其运行可靠性^[1], 预紧转矩的变化会直接引起滚珠与丝杠或螺母滚道接触参数的

改变^[2], 进而影响丝杠副的刚性和定位精度等一系列性能, 但是由于加工制造的原因, 丝杠副会不可避免的存在加工尺寸误差, 其中导程误差、中径误差是影响预紧转矩的关键加工尺寸误差, 因此研究滚珠丝杠副导程误差、中径误差与预紧转矩的关系具有重要意义。

国际上目前流行的预紧力与预紧转矩计算方法是 NSK 公司在 2003 年提出的经验公式^[3], 该方法讨论了螺

收稿日期: 2021-08-09 Received Date: 2021-08-09

* 基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX04039001)项目资助

旋升角对预紧转矩的影响,但并没有考虑接触角、摩擦系数等影响预紧转矩变化的因素。Frey等^[4]研究了滚珠丝杠副预紧转矩与定位精度、转速、导程误差之间的关系。考虑接触变形以及接触角等影响预紧转矩的因素,Wei等^[5-6]对滚珠丝杠副进行了运动学研究。程光仁^[7]考虑了丝杠副的效率和导程,建立了国内通用的预紧力与预紧转矩的经验公式,胡建忠等^[8]根据接触强度分析建立了轴向预紧力计算公式。Zhou等^[9]研究了预紧转矩与预紧力的关系,考虑了接触角、摩擦系数等因素的影响建立了新的预紧转矩计算模型。上述研究主要针对预紧力与预紧转矩的计算方法进行了研究,并没有涉及加工制造误差对滚珠丝杠副的预紧转矩的影响。

滚珠丝杠副的加工品质的高低决定了其服役性能的优劣,中径误差、导程误差是影响滚珠丝杠副预紧转矩的主要加工尺寸误差,Kagiwada等^[10]研究了螺母内滚道的型面特征及加工方法,提出了螺母内滚道误差的测量方法;Sostar等^[11]基于三坐标测量仪对内螺纹塞规进行了螺距和内径的测量,并分析了测量不确定度;荷兰的IAC公司研制成功的MSXP系列螺纹扫描测量仪,可测量普通螺纹和螺纹量规的中径、大径、螺距、牙型角等参数^[12];付胜华等^[13]建立了高速大行程滚珠丝杠副大型测控平台;刘庆明等^[14]提出基于机器视觉的螺纹中径测量方法,并分析了测量误差的产生原因;以上方法可以较准确的测量加工误差,但没有针对关键加工尺寸误差与滚珠丝杠副预紧转矩的映射关系进行深入研究。

本文基于接触变形与载荷分布理论,结合林炜国等^[15-16]之前的导程误差与摩擦力矩研究结果,建立了滚珠丝杠副关键加工尺寸误差—中径误差、导程误差与预紧转矩的关系模型,并进行了实验验证。

1 滚珠丝杠副关键加工尺寸误差与预紧转矩关系模型

中径是指滚珠丝杠或者螺母相位角 180° 与滚道接触的两个滚珠球心的距离,如图1所示,中径值反映的是多个滚道型面参数(接触角、适应比、偏心距、齿形截面误差等)的综合尺寸。滚珠丝杠的中径偏差为滚珠丝杠的实际中径值与理论值的差值,即 $\Delta d_s = d_s - d_0$, d_s 为滚珠丝杠实际中径值, d_0 为滚珠丝杠理论中径值,相应地,螺母的中径偏差为 $\Delta d_n = d_n - d_0$ 。

1.1 中径误差与四点接触式滚珠丝杠副预紧转矩关系

如图2所示为增大钢球式单螺母滚珠丝杠副,插入比滚道空间略大的滚珠,致使滚珠4点接触,滚珠发生弹性变形产生预紧力,改变滚珠直径尺寸过盈量以调节预紧力。

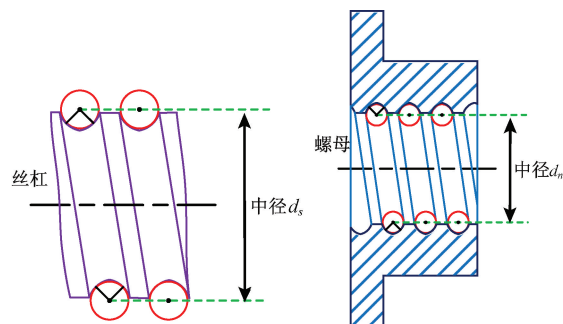


图1 滚珠丝杠、螺母中径

Fig. 1 Pitch diameter of ball screw and nut

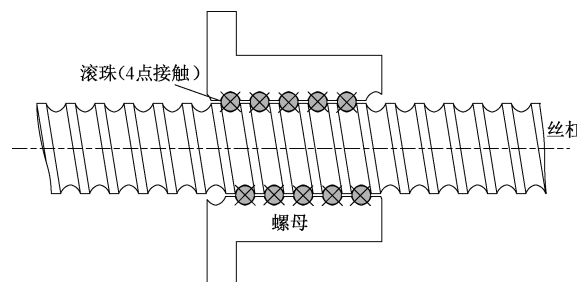


图2 4点接触式滚珠丝杠副

Fig. 2 Four point contact ball screw pair

当滚珠的过盈量为0时,滚珠刚好与丝杠螺母滚道4点接触,如图3所示,设此时的滚珠直径为 d_{b0} ,滚珠丝杠副的预紧载荷 F_p 为0。

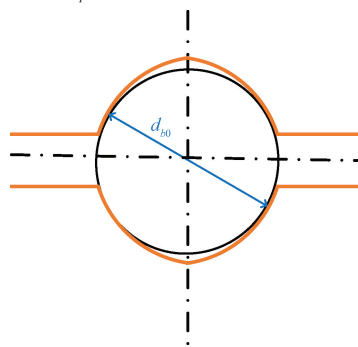


图3 4点接触滚珠丝杠副单个滚珠接触状态

Fig. 3 Single ball contact state of four point contact ball screw

当滚珠的直径为 d_{b1} 时,不存在其他误差时,文献^[15]提出,各滚珠受力大小相等,各滚珠的接触变形量 σ_b 为:

$$\sigma_b = d_{b1} - d_{b0} \quad (1)$$

则滚珠丝杠副的预紧力为:

$$F_p = N \cdot (Y_s \cdot \sqrt[3]{\sum \rho_s} + Y_n \cdot \sqrt[3]{\sum \rho_n \cdot c_E^2})^{2/3} \cdot \sigma_b^{3/2} \cdot \sin \alpha_p \cdot \cos \lambda \quad (2)$$

若令 $c_K = Y_s \cdot \sqrt[3]{\sum \rho_s} + Y_n \cdot \sqrt[3]{\sum \rho_n}$, 则式(2)可以表示为:

$$F_p = N \cdot (c_K \cdot c_E^2)^{2/3} \cdot \sigma_b^{3/2} \cdot \sin \alpha_p \cdot \cos \lambda \quad (3)$$

式中: Y_s, Y_n 分别为丝杠与螺母在赫兹接触理论中对于第一类和第二类椭圆积分的辅助值; ρ_s, ρ_n 分别为滚珠-丝杠滚道与滚珠-螺母滚道接触点处的曲率半径倒数; N 为螺母内有效承载滚珠个数; c_E 为材料常数, 对于滚珠的材料轴承钢, $c_E = 0.4643$; α_p 为滚珠与滚道接触角; λ 为滚珠丝杠的螺旋升角。 ρ_s, ρ_n, Y_s, Y_n 可表示如下:

$$\begin{cases} \sum \rho_s = \frac{4}{d_b} - \frac{1}{f_{rs} \cdot d_b} + \frac{2 \cos \alpha}{d_m - d_b \cdot \cos \alpha} \\ \sum \rho_n = \frac{4}{d_b} - \frac{1}{f_{rn} \cdot d_b} - \frac{2 \cos \alpha}{d_m + d_b \cdot \cos \alpha} \\ Y_s = 1.282 \left[-0.154 (\sin \tau_s)^{1/4} + 1.384 (\sin \tau_s)^{1/2} - 0.194 \sin \tau_s \right] \\ Y_n = 1.282 \left[-0.154 (\sin \tau_n)^{1/4} + 1.384 (\sin \tau_n)^{1/2} - 0.194 \sin \tau_n \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_b 为滚珠直径; d_m 为滚珠所在节圆直径; f_{rs} 为丝杠滚道与滚珠直径之比; f_{rn} 为螺母滚道与滚珠直径之比; $\sin \tau_s$ 和 $\sin \tau_n$ 可由滚珠滚道接触椭圆的长短半径比求得:

$$\begin{cases} \sin \tau_s = \sqrt{1 - \left(\frac{-\frac{1}{f_{rs} d_b} - \frac{2 \cos \alpha}{d_m - d_b \cdot \cos \alpha}}{\sum \rho_s} \right)^2} \\ \sin \tau_n = \sqrt{1 - \left(\frac{-\frac{1}{f_{rn} d_b} - \frac{2 \cos \alpha}{d_m + d_b \cdot \cos \alpha}}{\sum \rho_n} \right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

如图 4 所示为单个滚珠的接触变形分析, 当丝杠的中径误差为 Δd_s 时, 丝杠滚道的曲率中心由 O_s 向下偏移 $\Delta d_s/2$ 至 O'_s , 而螺母不存在中径误差, 螺母滚道的曲率中心 O_n 不发生偏移, 则 $O_s O_n, O'_s O_n$ 的长度为:

$$\begin{cases} O_s O_n = r_s + r_n - 2r_b = r_s + r_n - d_{b0} = r_0 \\ O'_s O_n = \sqrt{(O_s O_n \cdot \sin \alpha_0)^2 + (O_s O_n \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: r_s, r_n, r_b 分别为丝杠滚道、螺母滚道与滚珠半径。

滚珠的法向接触变形量、接触角为:

$$\begin{cases} \sigma'_b = d_{b1} - (r_s + r_n - O'_s O_n) = d_{b1} - (r_s + r_n) + \sqrt{(r_0 \cdot \sin \alpha_0)^2 + (r_0 \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2} \\ \sin \alpha = \frac{r_0 \cdot \sin \alpha_0}{\sqrt{(r_0 \cdot \sin \alpha_0)^2 + (r_0 \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

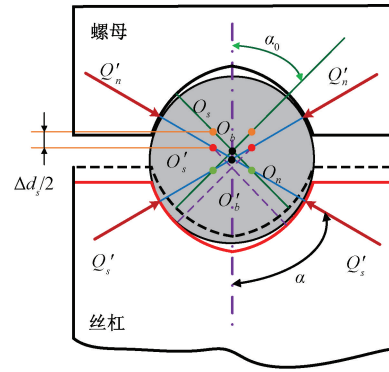


图 4 中径偏差 Δd_s 时单个滚珠接触状态

Fig. 4 Contact state of single ball with the pitch diameter deviation Δd_s

则滚珠丝杠副的预紧力为:

$$F_p = N \cdot (c_K \cdot c_E^2)^{2/3} \cdot \sigma_b^{3/2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \lambda \quad (8)$$

1.2 导程误差、中径误差与两点接触式滚珠丝杠副预紧转矩关系模型

单螺母滚珠丝杠的预紧方式主要有变导程式预紧和增大滚珠直径式预紧, 双螺母比较常见的是增加垫片式预紧, 如图 5 所示为变导程式滚珠丝杠副, 左半螺母与右半螺母所受载荷方向相反大小相等, 增大钢球式滚珠丝杠副存在导程误差时, 丝杠滚道的曲率中心发生轴向偏移, 滚珠由四点接触变成两点接触, 为实现螺母内力平衡, 滚珠的接触状态变为与变导程式滚珠丝杠副接触状态相同。垫片式滚珠丝杠副通过在双螺母之间增加垫片来提供预紧力, 通过调节垫片厚度控制预紧力的大小, 其滚珠受力状态与变导程式滚珠丝杠副相同。

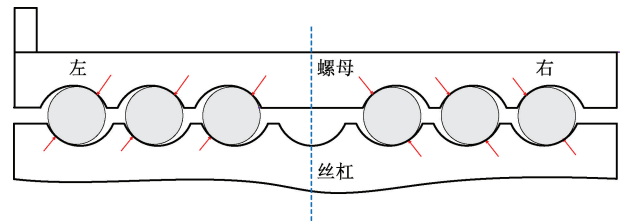


图 5 变导程式滚珠丝杠副接触状态

Fig. 5 Contact state of variable lead ball screws

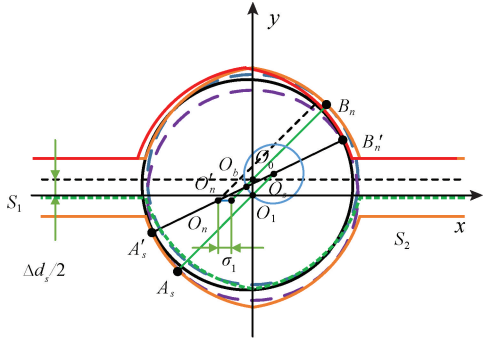
两点接触式滚珠丝杠存在中径偏差时, 滚珠受力变形之前首先会导致初始接触角的变化。如图 6(a) 所示为存在中径偏差的滚珠接触示意图, 虚线 S_1 为丝杠理论滚道 ($\Delta d_s = 0$), 实线 S_2 为存在中径误差 Δd_s 的实际丝杠滚道, 此时螺母滚道与丝杠滚道产生 $\Delta d_s/2$ 的径向间隙, 滚珠无法与丝杠、螺母滚道同时接触, 设 O_0 为 $\Delta d_s = 0$ 时滚珠球心, O_1 为存在中径误差 Δd_s 时与丝杠滚道接触的滚珠球心, 以 $O_1(0, 0)$ 为坐标系原点, 法截面的对称线为

y 轴, y 轴的垂直轴线为 x 轴, 建立接触坐标系, 如图 6(b) 所示, O_0, O_1 距离为 $\Delta d_s/2$, 则 O_0 坐标为 $(0, -\Delta d_s/2)$, O_s 为丝杠滚道曲率中心, O_n 为螺母滚道曲率中心, 螺母滚道轴向移动 σ_1 (向右移动为正, 向左移动为负) 使滚珠刚好与丝杠、螺母滚道同时接触, 此时即为所求初始接触角 α'_0 , 轴向移动 σ_1 后的螺母滚道曲率中心为 O'_n , $O_n O_0$ 距离为螺母滚道半径与滚珠半径之差 $r_n - r_b$, 螺母滚道曲率中心 $O_n(x_n, y_n)$ 为:

$$\begin{cases} x_n = -(r_n - r_b) \sin \alpha_0 \\ y_n = -\Delta d_s/2 - (r_n - r_b) \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (9)$$

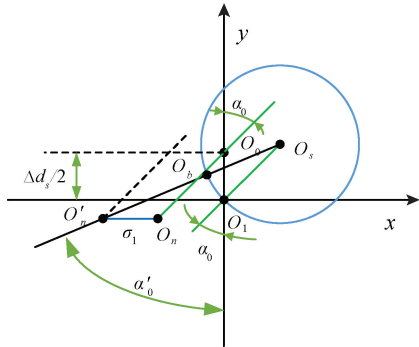
移动后螺母滚道曲率中心 $O'_n(x'_n, y'_n)$:

$$\begin{cases} x'_n = -(r_n - r_b) \sin \alpha_0 - \sigma_1 \\ y'_n = -\Delta d_s/2 - (r_n - r_b) \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (10)$$



(a) 存在中径偏差的滚珠接触

(a) Ball contact with pitch diameter deviation



(b) 两点接触坐标系

(b) Two point contact coordinate system

图 6 两点接触式滚珠丝杠副单个滚珠受力分析

Fig. 6 Force analysis of single ball of two-point contact ball screws

$O_s O_1$ 距离为丝杠滚道半径与滚珠半径之差 $r_s - r_b$, 丝杠滚道曲率中心 $O_s(x_s, y_s)$:

$$\begin{cases} x_s = (r_s - r_b) \sin \alpha_0 \\ y_s = (r_s - r_b) \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (11)$$

则直线 $O'_n O_s$ 与 y 轴夹角为实际初始接触角 α'_0 , 如

图 6(a) 所示, 该直线与丝杠、螺母滚道交点 A'_s, B'_n (A_s, B_n 为理论滚道接触点) 为实际接触点, $O'_n O_s$ 距离为 $r_s + r_n - 2r_b$, 以丝杠曲率中心 O_s 为圆心, $O_s O_1$ 为半径画圆, 与直线 $O'_n O_s$ 的交点即为此时滚珠球心 O_b , $O_s O_b$ 距离为 $r_s - r_b$, $O'_n O_b$ 距离为 $r_n - r_b$, 则滚珠初始接触角 α'_0 为:

$$\cos \alpha'_0 = \frac{y_s - y'_n}{r_s + r_n - 2r_b} = \frac{(r_s + r_n - 2r_b) \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2}{r_s + r_n - 2r_b} = \frac{r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2}{r_0} \quad (12)$$

则螺母轴向移动距离 σ_1 为:

$$\sigma_1 = \sqrt{r_0^2 - (r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2} - r_0 \sin \alpha_0 \quad (13)$$

当同时存在导程误差、中径误差时, 螺母内滚珠的受力状态如图 7 所示, 设不存在其他误差, 则左半螺母内滚珠与右半螺母受力大小相等方向相反, 由于不存在预紧垫片的作用, 公式中 $\sigma_a = 0$, 以单个滚珠进行分析, 存在中径误差以及导程误差时, 丝杠滚道曲率中心 O_s 先是纵向偏移 $\Delta d_s/2$ 至 O'_s 然后横向偏移至 O''_s , 以螺母滚道曲率中心 O_n 为原点建立坐标系, 如图 8 所示, 则此时 $O_n O'_s$ 距离为:

$$r'_{oi} = \sqrt{(r_0 \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha_0 - \Delta L_i)^2} \quad (14)$$

则此时滚珠的接触变形量以及接触角为:

$$\begin{cases} \delta'_{ni} = d'_i - (r_s + r_n - r'_{oi}) \\ \cos \alpha_i = \frac{r_0 \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2}{\sqrt{(r_0 \cdot \cos \alpha_0 + \Delta d_s/2)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha_0 - \Delta L_i)^2}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: d'_i 为实际滚珠直径, 存在导程误差时, 两颗滚珠之间的轴向偏移量为 $\Delta P_h/Z$, 为保证单螺母内滚珠受力平衡且对称, 左右两半螺母的第一颗滚珠需均分轴向偏移量 $\Delta P_h/Z$ 以达到受力平衡, 则第一颗滚珠的轴向偏移量为:

$$\begin{cases} a = 0.5 \cdot \Delta P_h/Z \\ \Delta L_i = (i - 0.5) \cdot \Delta P_h/Z \end{cases} \quad (16)$$

滚珠丝杠副预紧时, 滚珠轴向变形量将在 $\Delta d_s = 0$ 的基础上增加或减小 σ_1 , 则存在中径偏差 Δd_s 时, 两点接触式滚珠丝杠副接触变形量、接触角、预紧力为:

$$\begin{cases} \delta'_{ai} = \delta_{ai} - \sigma_1 \\ \delta'_{ni} = \sqrt{(r_0 \cdot \sin \alpha'_0 + \delta'_{ai})^2 + (r_0 \cdot \cos \alpha'_0)^2} - r_0 \\ \cos \alpha'_i = \frac{r_0 \cdot \cos \alpha'_0}{\sqrt{(r_0 \cdot \sin \alpha'_0 + \delta'_{ai})^2 + (r_0 \cdot \cos \alpha'_0)^2}} \\ F'_p = \sum_{i=1}^Z F'_{pi} = \sum_{i=1}^Z \left(\frac{\delta'_{ni}}{c_K \cdot c_E^2} \right)^{3/2} \cdot \sin \alpha'_i \cdot \cos \lambda \end{cases} \quad (17)$$

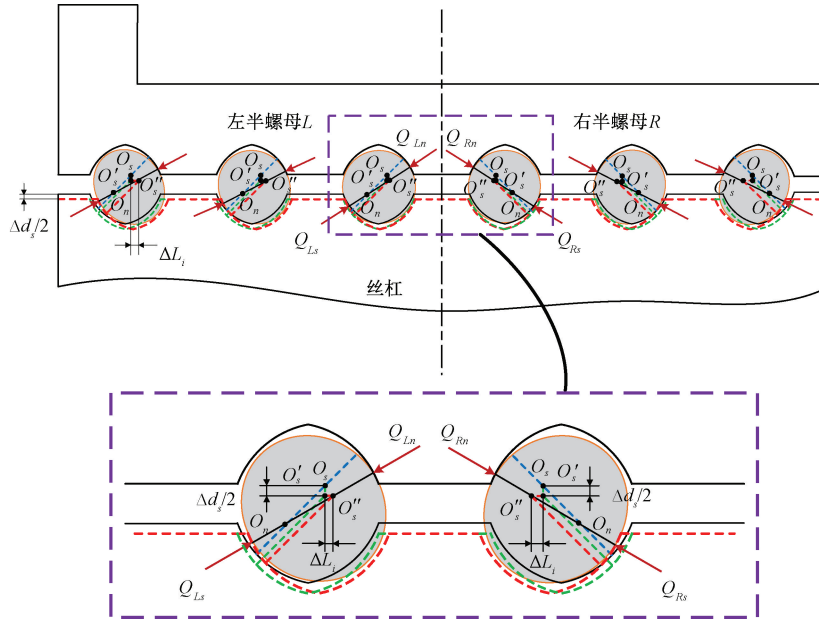


图 7 存在导程误差、中径误差时滚珠丝杠副接触状态

Fig. 7 Contact state of ball screw pair with lead error and pitch diameter error

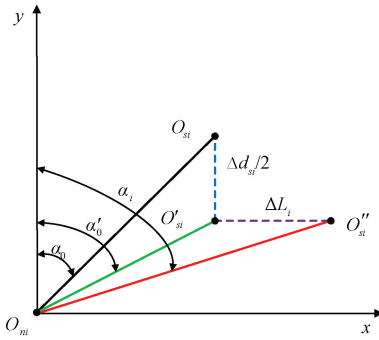


图 8 存在导程误差、中径误差时滚珠丝杠副单个滚珠接触分析

Fig. 8 Analysis of single ball contact state of ball screw pair with lead error and pitch diameter error

结合文献[15]推导的导程误差与预紧转矩关系模型如式(18)所示。

$$\begin{cases}
 M = 2\mu \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ni}}{c_k \cdot c_E^2} \right)^{3/2} \cdot \cos \lambda (r_m + r_b \cos \alpha_i) \\
 \delta_{ni} = \begin{cases} \sqrt{(r_0 \cdot \cos \alpha_0)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha_0 + \sigma_a + \Delta L_i \cdot \cos \lambda)^2} - r_0, & \Delta P_h < 0 \\ \sqrt{(r_0 \cdot \cos \alpha_0)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha_0 + \sigma_a - \Delta L_i \cdot \cos \lambda)^2} - r_0, & \Delta P_h > 0 \end{cases} \\
 \Delta L_i = (i - 1) \cdot |\Delta P_h / Z| + a \\
 \cos \alpha_i = \frac{r_0 \cdot \cos \alpha_0}{r_0 + \delta_{ni}}
 \end{cases} \tag{18}$$

式中: δ'_{ai} 代表第 i 个滚珠和滚道之间的轴向接触变形量, δ'_{ni} 代表第 i 个滚珠和滚道之间的法向接触变形量。

当存在导程误差、中径偏差时的预紧转矩计算模型如式(19)所示。

$$\begin{cases}
 \sigma_1 = \sqrt{r_0^2 - (r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s / 2)^2} - r_0 \sin \alpha_0, \cos \alpha'_0 = \frac{r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s / 2}{r_0} \\
 \delta_{ai} = \sigma_a - \Delta L_i \cdot \cos \lambda - \sigma_1, \Delta L_i = (i - 1) \cdot \Delta P_h / Z + a \\
 \delta'_{ni} = \sqrt{(r_0 \cdot \cos \alpha'_0)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha'_0 + \delta_{ai})^2} - r_0 = \sqrt{(r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s / 2)^2 + (r_0 \cdot \sin \alpha_0 + \sigma_a - \Delta L_i \cdot \cos \lambda)^2} - r_0 \\
 \cos \alpha_i = \frac{r_0 \cos \alpha_0 + \Delta d_s / 2}{r_0 + \delta'_{ni}} \\
 F'_p = \sum_{i=1}^N F'_{pi} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ni}}{c_k \cdot c_E^2} \right)^{3/2} \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \lambda \\
 M = 2\mu \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ni}}{c_k \cdot c_E^2} \right)^{3/2} \cdot \cos \lambda (r_m + r_b \cos \alpha_i)
 \end{cases} \tag{19}$$

2 试验研究

为了验证本文的关键加工尺寸误差与预紧转矩关系模型的准确性,只需要验证导程误差、中径误差影响下计算的理论预紧转矩与试验测得预紧转矩是否一致。试验需要通过滚珠丝杠型面检测、导程误差、滚珠丝杠副预紧转矩试验台测量滚珠丝杠中径值、导程误差以及预紧转矩。

采用单螺母增大钢球式滚珠丝杠副进行试验验证,丝杠规格为40×12×6,精度等级P2级,图9所示为试验流程,在不安装螺母的情况下,测量一系列加工误差不同的滚珠丝杠的导程误差、中径误差,将各丝杠分别匹配同一套螺母、滚珠组成丝杠副,更换丝杠而不更换螺母、滚珠,根据ISO标准测量各丝杠与螺母组成丝杠副的预紧转矩,丝杠、螺母、滚珠的相关参数如表1所示。

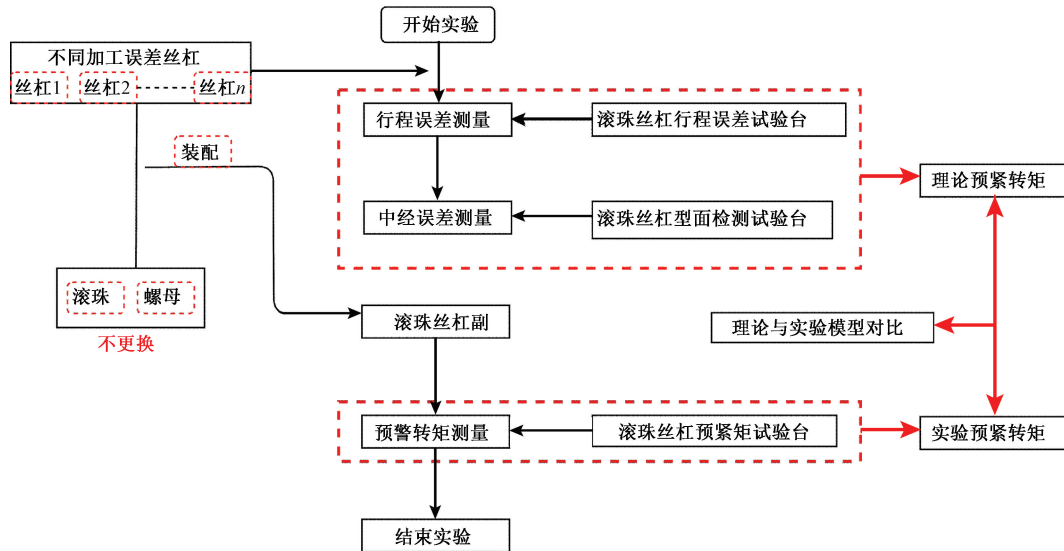


图9 试验流程
Fig. 9 Test flow

表1 丝杠、螺母、滚珠参数表

Table 1 Parameters of screw, nut and ball

参数	数值
滚珠半径 r_b /mm	3.179
滚珠丝杠公称直径 r_m /mm	16
螺母滚道曲率半径 r_n /mm	3.366
丝杠滚道曲率半径 r_s /mm	3.366
丝杠滚道适应比	0.54
滚珠滚道适应比	0.54
丝杠测量有效长度/mm	600
螺旋升角 λ /($^\circ$)	6.81
初始接触角 α_0 /($^\circ$)	45
导程 P_h /mm	12
循环圈数×列数	6×1
单圈滚珠个数 Z	15
滚珠个数 N	90
摩擦系数 μ	0.003 0

2.1 导程误差、型面检测试验台

如图10所示为滚珠丝杠副导程误差试验台,该试验台由圆光栅、激光位移传感器、气浮工作台和伺服电机组成。丝杠旋转所需的扭矩由伺服电机提供,工作台采用气浮支撑,降低了轴向运行过程中的阻力干扰,球形测量头安装在工作台上并与丝杠滚道啮合。电机驱动丝杠旋转从而使工作台轴向移动,激光位移传感器可以采集工作台的实际轴向位移,而圆光栅通过采集丝杠的角度变化计算出丝杠的理论轴向位移,实际轴向位移与理论轴向位移的差值即为丝杠的导程误差。导程误差试验台的测量精度为0.01 μm ,试验台需要在温度湿度相对恒定的环境下运行,试验环境温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,环境湿度 $50\% \pm 5\%$,安装同轴度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 方可实验。实验测得的19根丝杠的导程误差如表2所示。

如图11所示为滚珠丝杠型面检测试验台,该试验台由电机、位移平台、直线光栅尺、光幕式传感器等组成。将待测丝杠安装于试验台,旋转转台至光幕式传感器与丝杠螺旋滚道方向平行,使得光幕传感器发出的光线与丝杠滚道垂直,电机驱动使位移平台轴向移动进而带动光幕式传感器轴向移动,测量丝杠母线的法向轮廓的

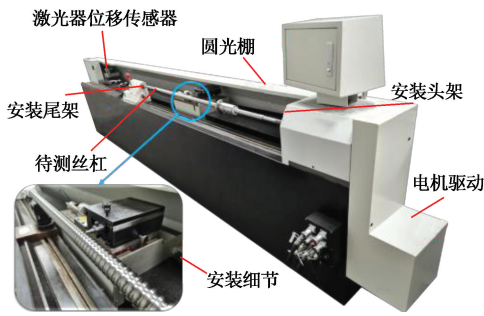


图 10 滚珠丝杠副导程误差试验台
Fig. 10 Ball screw travel error test bench

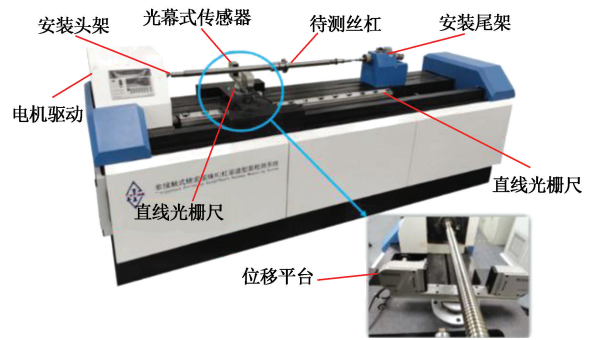


图 11 滚珠丝杠型面检测试验台
Fig. 11 Ball screw profile inspection test bench

表 2 导程误差、中径值、预紧转矩实验数据

Table 2 Experimental data of lead error, pitch diameter and pre-tightening torque

丝杠	中径值/ mm	ΔP_n / μm	预紧转矩/ Nm
1	32.747	-0.053	0.705
2	32.745	-0.140	0.630
3	32.744	-0.168	0.612
4	32.744	-0.055	0.649
5	32.742	-0.048	0.599
6	32.742	-0.015	0.527
7	32.741	-0.140	0.530
8	32.741	-0.024	0.508
9	32.741	-0.033	0.525
10	32.741	-0.015	0.435
11	32.740	-0.056	0.465
12	32.740	-0.032	0.494
13	32.739	-0.623	0.507
14	32.739	-0.466	0.504
15	32.739	-0.319	0.410
16	32.738	-0.726	0.495
17	32.738	-0.374	0.368
18	32.737	-0.666	0.359
19	32.737	-0.607	0.419

x, y 坐标,通过软件计算得到滚珠丝杠的中径尺寸。滚珠丝杠型面检测试验台的测量精度为 $0.01 \mu\text{m}$,试验台需要在温度湿度相对恒定的环境下运行,试验环境温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,环境湿度 $50\% \pm 5\%$,试验要求安装同轴度 $\pm 0.01 \text{mm}$ 。实验测得的中径值如表 2 所示。

2.2 预紧转矩试验台

滚珠丝杠副预紧转矩试验台由工作台、伺服电机、滚动直线导轨以及力传感器组成。如图 12 所示,与螺母滚道啮合的支撑座安装在工作台上,伺服电机驱动丝杠旋转时会带动工作台在直线导轨上轴向运动,螺栓安装在螺母法兰上,其伸出部分与力传感器接触,通过力传感器示数用软件计算出丝杠副的预紧转矩。预紧转矩试验台的测量精度为 0.0001Nm ,试验台头尾架同轴度要求在 0.02mm 以内。实验测得的预紧转矩值如表 2 所示。

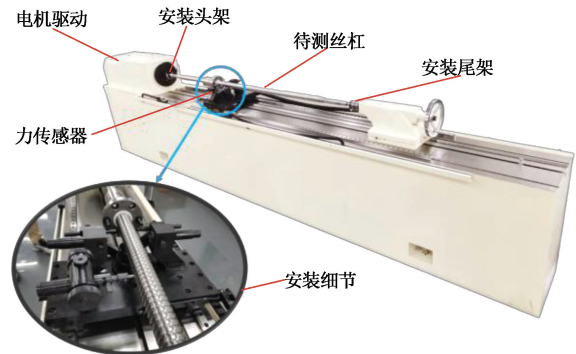


图 12 滚珠丝杠副预紧转矩试验台
Fig. 12 Ball screw preload torque test bench

3 试验结果与分析

由于加工存在不确定性,无法通过测量丝杠的中径值得出其中径误差值,需要根据预紧转矩试验值反推出丝杠的中径偏差值;由文献[15]可知,导程误差越大,载荷分布越不均匀,因此,导程误差越接近 0,滚珠丝杠副预紧转矩受导程误差的影响越小,基于预紧转矩试验值计算的中径偏差值越准确,试验测量中,6 号丝杠的导程误差为 $-0.015 \mu\text{m}$ 接近 0,通过预紧转矩试验值计算该丝杠的中径偏差为 -0.006mm ,则该批样件的标准中径值为 32.748mm ,进而可得出各丝杠的中径偏差值以及预紧转矩理论计算值。

将表2所测导程误差、中径误差结果代入式(19)得出本文模型所计算的理论预紧转矩值。表3所示为基于加工误差的预紧转矩的试验数据与理论计算数据对比表,预紧转矩的理论计算值与试验值的相对误差在12.18%以内,理论模型与实际预紧转矩的一致性较好。

表3 基于加工误差的预紧转矩试验数据与理论计算数据

Table 3 Preload torque test data and theoretical calculation data based on machining error

丝杠	中径值/ mm	Δd_s / mm	ΔP_h / μm	预紧转矩		
				理论/ Nm	试验/ Nm	相对误差/ %
1	32.747	-0.001	-0.053	0.791	0.705	12.18
2	32.745	-0.003	-0.140	0.698	0.630	10.84
3	32.744	-0.004	-0.168	0.651	0.612	6.41
4	32.744	-0.004	-0.055	0.634	0.649	2.31
5	32.742	-0.006	-0.048	0.535	0.599	10.73
6	32.742	-0.006	-0.015	0.530	0.527	0.65
7	32.741	-0.007	-0.140	0.501	0.530	5.40
8	32.741	-0.007	-0.024	0.485	0.508	4.66
9	32.741	-0.007	-0.033	0.486	0.525	7.53
10	32.741	-0.007	-0.015	0.483	0.435	11.08
11	32.740	-0.008	-0.056	0.444	0.465	4.60
12	32.740	-0.008	-0.032	0.440	0.494	10.88
13	32.739	-0.009	-0.623	0.478	0.507	5.68
14	32.739	-0.009	-0.466	0.456	0.504	9.58
15	32.739	-0.009	-0.319	0.435	0.410	6.17
16	32.738	-0.010	-0.726	0.448	0.495	9.63
17	32.738	-0.010	-0.374	0.399	0.368	8.48
18	32.737	-0.011	-0.666	0.396	0.359	10.22
19	32.737	-0.011	-0.607	0.388	0.419	7.41

中径误差、导程误差作为两个单独影响预紧转矩的关键加工尺寸误差,其中任何一个量的变化都会导致预紧转矩的变化。由图13可以看出,预紧转矩会随着导程误差、中径误差的增大而减小,同时中径误差对预紧转矩的影响明显大于导程误差。

目前国内主要根据经验公式^[17]来计算滚珠丝杠副预紧转矩,文献[17]中预紧转矩计算模型并没有考虑关键加工尺寸误差对预紧转矩的影响。根据表4,文献[17]求得的预紧转矩理论值与实验值相对误差15.07%~43.57%,远远高于本文模型的0.65%~12.18%,验证了本文模型的准确性。

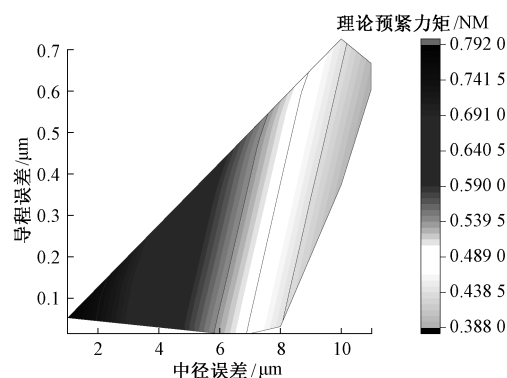


图13 中径误差、导程误差与预紧转矩关系

Fig. 13 Relationship among pitch diameter error, lead error and preload torque

表4 本文模型、文献[17]模型误差对比

Table 4 Comparison of model error between this model and reference [17]

预紧转矩 试验值/ (N·M)	本文模型		文献[17]模型	
	计算值/ (N·M)	相对误差/ %	计算值/ (N·M)	相对误差/ %
0.705	0.791	12.18	1.009	43.05
0.630	0.698	10.84	0.894	41.86
0.612	0.651	6.41	0.835	36.48
0.649	0.634	2.31	0.813	25.34
0.599	0.535	10.73	0.689	15.07
0.527	0.530	0.65	0.683	29.57
0.530	0.501	5.40	0.647	22.04
0.508	0.485	4.66	0.626	23.26
0.525	0.486	7.53	0.627	19.51
0.435	0.483	11.08	0.624	43.35
0.465	0.444	4.60	0.574	23.52
0.494	0.440	10.88	0.570	15.22
0.507	0.478	5.68	0.620	22.22
0.504	0.456	9.58	0.591	17.28
0.410	0.435	6.17	0.564	37.53
0.495	0.448	9.63	0.582	17.56
0.368	0.399	8.48	0.518	40.83
0.359	0.396	10.22	0.515	43.57
0.419	0.388	7.41	0.505	20.53

4 结 论

本文考虑滚珠丝杠加工制造中存在的加工尺寸误差对滚珠丝杠副的预紧转矩计算方法进行了研究,分

析研究结果表明:

1) 当丝杠存在中径误差时,滚珠接触角会发生变化,预紧转矩随之变化,中径误差增大,预紧转矩随之减小。

2) 导程误差、中径误差会同时影响预紧转矩,预紧转矩会随着导程误差、中径误差的增大而减小,导程误差对预紧转矩的影响效果大于中径误差。因此在加工中需要加强对关键加工尺寸误差的管控,特别是中径误差值。

3) 本文计算模型理论值与试验值误差为 0.65% ~ 12.18%,验证本文模型的准确性。

4) 本文模型与文献[17]对比,文献[17]计算相对误差范围 15.07% ~ 43.57%,远大于本文模型计算的 0.65% ~ 12.18%,对比结果表明,不考虑导程误差、中径误差会导致预紧转矩计算结果误差较大,验证本文模型的有效性与先进性。

参考文献

- [1] VERL A, FERY S, HEINZE T. Double nut ball screw with improved operating characteristics [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, 63(1): 361-364.
- [2] 周长光. 滚珠丝杠副预紧力衰退预测及试验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- ZHOU CH G. Theoretical and experimental investigation of the preload loss of ball screws[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [3] OYANGUREN A, LARRAñAGA J, ULACIA I. Thermo-mechanical modelling of ball screw preload force variation in different working conditions [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1-4), DOI:10.1007/s00170-018-2008-8.
- [4] FREY S, WALTHER M, VERL A. Periodic variation of preloading in ball screws [J]. *Production Engineering*, 2010, 4(2-3): DOI:10.1007/s11740-010-0207-8.
- [5] WEI C C, LAI R S. Kinematical analyses and transmission efficiency of a preloaded ball screw operating at high rotational speeds [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2011, 46(7): 880-898.
- [6] WEI C C, LIN J F. Kinematic analysis of the ball screw mechanism considering variable contact angles and elastic deformations [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(4): 717-733.
- [7] 程光仁. 滚珠螺旋传动设计基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1987: 140-165.
- CHENG G R. Design basis of ball screw transmission[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987: 140-165.
- [8] 胡建忠, 王民, 高相胜, 等. 双螺母定位预紧滚珠丝杠副轴向接触刚度分析 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 60-69.
- HU J ZH, WANG M, GAO X SH, et al. Axial contact stiffness analysis of position preloaded ball screw mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 60-69.
- [9] ZHOU C G, FENG H T, CHEN Z T, et al. Correlation between preload and no-load drag torque of ball screws [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016(102): 35-40.
- [10] KAGIWADA T, HARADA H. Method for ball screw generation without form-dressing [J]. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 1996, 39(4), DOI:10.1299/jsmec.1993.39.871.
- [11] SOSTAR A, ACKO B. Traceability of thread ring calibration on a coordinate measuring machine [C]. XVI IMEKO World Congress (IMEKO 2000) Proceedings Vol. 5. Laboratory for Production Measurement, Faculty of Mechanical Engineering University of Maribor, 2000.
- [12] METROLOGY F C O, GALESTIEN R. Advanced 2D scanning: The solution for the calibration of thread ring and thread plug gauges [M]. ISTE, 2010, DOI: 10.1002/9780470611371.
- [13] 付胜华, 韩秋实, 王红军. 高速大行程滚珠丝杠副智能测控平台的伺服控制 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(11): 1821-1827.
- FU SH H, HAN Q SH, WHANG H J. Servo control of intelligent measurement and control platform for ball screw with high speed and large range [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1821-1827.
- [14] 刘庆民, 王龙山, 陈向伟, 等. 滚珠螺母的机器视觉检测 [J]. *吉林大学学报(工)*, 2006, 36(4): 534-538.
- LIU Q M, WANG L SH, CHEN X W, et al. Ball nut detection by machine vision [J]. *Journal of Jilin University*, 2006, 36(4): 534-538.
- [15] 祖莉, 林炜国, 张鲁超, 等. 双螺母滚珠丝杠副导程误差与摩擦力矩关系研究 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 397-406.
- ZU L, LIN W G, ZHANG L CH, et al. Study on the relationship between lead error and friction torque of double-nut ball screw [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 397-406.
- [16] 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.

- [17] 刘莉,姜洪奎. 滚珠丝杠副动态预紧转矩检测国内外标准比较和分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015 (2): 113-116.

LIU L, JIANG H K. Comparison and analysis of the measuring standard of dynamic friction torque of ball screw mechanism [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015 (2): 113-116.

作者简介



刘东, 2017 年于南京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: 641658073@qq.com

Liu Dong received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2017. He is currently a master student at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include 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 a master advisor at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interests include the performance research and measurement of rolling functional components of CNC machine tools, the design and application of precision drive of servo system.