

人形机器人关节用新型行星滚柱丝杠副 加工误差作用机理

乔冠^{1,2,3,4}, 贾文浩¹, 刘永良⁴, 严作海⁵, 王志琪¹, 谢海波³, 高培军⁴

(1. 内蒙古工业大学内蒙古自治区机器人与智能装备技术重点实验室, 010051, 呼和浩特;

2. 浙江兆丰机电股份有限公司, 311231, 杭州; 3. 浙江大学机械工程学院, 310027, 杭州;

4. 特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室, 014032, 内蒙古包头;

5. 杭州新剑机电传动股份有限公司, 311300, 杭州)

摘要: 为提高人形机器人关节对高承载、高精度和紧凑集成执行器的需求, 针对新型反向循环式行星滚柱丝杠副 (IRPRSM) 在加工误差作用下啮合位置与轴向间隙难以预测的问题, 建立了 IRPRSM 的三体统一螺旋曲面方程和空间啮合模型, 得到在误差作用下实际啮合位置、啮合半径、偏角及轴向间隙等位置精度关键参数作用机理。研究表明: 偏心误差会使啮合半径和轴向间隙随机运动呈周期性波动, 且丝杠头数越多, 波动频率越高; 在 ± 0.03 mm 误差范围内, 丝杠与滚柱中径误差引起的轴向间隙差值不超过 $2\text{ }\mu\text{m}$; 当仅丝杠或仅滚柱存在牙型角误差时, 轴向间隙在 0° 处达到峰值 $24.58\text{ }\mu\text{m}$, 误差增至 $\pm 3^\circ$ 时降至约 $10\sim 12\text{ }\mu\text{m}$; 当牙型角误差同向等量变化时, 轴向间隙仅由 $22.87\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $26.11\text{ }\mu\text{m}$, 表明误差同步变化时对间隙的影响相对较小; 分头误差虽不改变轴向接触位置, 但会引起上下螺旋曲面间隙重新分配。该研究可为人形机器人关节线性执行器中 IRPRSM 的加工制造和高精度装配提供理论依据, 为我国人形机器人关节的多路径发展奠定基础。

关键词: 人形机器人; 关节; 行星滚柱丝杠副; 啮合特性; 加工误差

中图分类号: TH132.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2026)00-0000-00

Mechanism of Machining Error Effects on a Novel Planetary Roller Screw Mechanism for Humanoid Robot Joints

QIAO Guan^{1,2,3,4}, JIA Wenhao¹, LIU Yongliang⁴, YAN Zuohai⁵, WANG Zhiqi¹,

XIE Haibo³, GAO Peijun⁴

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China;

2. Zhejiang Zhaofeng Electromechanical Co., Ltd., Hangzhou, 311231, China; 3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou, 310027, China; 4. State Key Laboratory of Special Vehicle Design and Manufacturing Integration Technology,

Baotou, Inner Mongolia 014032, China; 5. Hangzhou Xinjian Electromechanical Transmission Co., Ltd., Hangzhou, 311300, China)

Abstract: To meet the requirements of humanoid robot joints for high load capacity, high precision, and compact integration, this study investigates the effects of machining errors on the meshing characteristics of a novel inverted recirculating planetary roller screw mechanism (IRPRSM). Unified three-body helical-surface equations and a spatial meshing model are established to determine the actual meshing position, meshing radius, deflection angle, and axial clearance. Results show that eccentricity errors cause periodic fluctuations in the meshing radius and axial clearance, with the frequency increasing with the number of screw starts. Within ± 0.03 mm, the difference between the axial clearances induced by screw and roller pitch-diameter errors is less than $2\text{ }\mu\text{m}$. When a flank-angle error occurs separately in the screw or roller, the axial clearance peaks at $24.58\text{ }\mu\text{m}$ at 0° and decreases to approximately $10\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ at $\pm 3^\circ$. When the screw and roller flank-angle errors vary equally in the same direction, the axial clearance increases only from $22.87\text{ }\mu\text{m}$ to $26.11\text{ }\mu\text{m}$. Thread-start indexing errors do not change the axial contact position but redistribute the clearances between the upper and lower helical flanks. The findings provide a theoretical basis for the manufacturing and precision assembly of IRPRSMs in humanoid robot joint actuators and support the diversified development of related joint technologies in China.

Keywords: humanoid robot; joint; planetary roller screw mechanism; meshing characteristics; machining error

收稿日期: 2026-04-14。 作者简介: 乔冠 (1990—), 男, 教授, 博士生导师; 王志琪 (通信作者), 女, 讲师, 硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52265009); 中国博士后科学基金资助项目 (2024M762956); 特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室开放课题特别资助项目 (GZ2025KF011)。

网络出版时间: 网络出版地址:

人形机器人在行走、负载操作及动态平衡过程中,需要多个关节实现高频启停、往复换向和精确位置输出,关节执行器的承载能力、传动精度及动态响应直接影响整机的运动稳定性和控制性能^[1],而行星滚柱丝杠副(Planetary Roller Screw Mechanism, PRSM)是一种能够实现旋转运动与直线运动高精度转换的机械传动装置,凭借其优越的负载能力、传动精度及长寿命等性能,能够满足人形机器人关节对高功率密度、高刚度和低回差线性传动的需求,在机器人关节集成式执行器领域具有良好的应用潜力^[2-5]。PRSM 主要包括标准式、反向式、循环式等,其中,反向式行星滚柱丝杠副(Inverted Planetary Roller Screw Mechanism, IPRSM)以螺母旋转运动作为输入,以丝杠直线运动作为输出,其螺母可以与电机融合设计,将螺母作为电机转子。循环式行星滚柱丝杠副(Recirculating Planetary Roller Screw Mechanism, RPRSM)由于其螺距较小、定位精度高以及制造工艺相对简便等特点,在要求小导程传动和需控制使用成本的应用场景中具有显著优势。结合二者的优点在近两年衍生出了新构型的反向循环式行星滚柱丝杠副(Inverted Recirculating Planetary Roller Screw Mechanism, IRPRSM)^[6],该机构兼具反向式易于与电机集成和循环式小导程传动的特点,为人形机器人关节紧凑型、高精度线性执行器提供了潜在的传动方案。

现研究主要围绕 PRSM 在理想装配条件下的运动学建模^[7-10]、结构参数设计^[11-12]、载荷分布^[13-15]、啮合机理分析^[16-17]及其接触性能^[18-20]展开,相关的成果多集中于几种常见结构,对新型反向循环式结构的研究较少,目前可见研究主要集中于设计与动力学方面的分析^[6],尚缺乏针对该类机构啮合特性的系统分析。同时,已有研究表明,加工误差是影响 PRSM 载荷分布、行程误差及传动精度的重要因素^[21-23],但现有研究结论尚难直接用于解释 IRPRSM 在复杂制造条件下的实际啮合特性。考虑到 IRPRSM 在结构上的独特性,其接触与啮合状态对误差的敏感性同样具有不同于其他形式 PRSM 的表现特征,因此,为提高人形机器人关节执行器的位置精度,揭示加工误差对关节执行器实际啮合状态与轴向间隙的作用机理,本文的主要研究内容为:(1)建立了同时考虑四类误差的丝杠-滚柱-螺母三体统一几何模型;(2)基于螺旋滚道参数化与空间曲面接触约束,推导了误差作用下实际啮合情况的解析表达式;(3)分析了不同加工误差对 IRPRSM 啮合行为及轴向间隙

的影响规律,为复杂制造工况下的啮合性能评估与优化设计提供理论支撑。

1 IRPRSM 结构与工作原理

如图 1 所示,IRPRSM 主要由丝杠、滚柱、螺母、保持架和凸轮环组成。其中,螺母和丝杠的牙形为三角形的单头或多头螺纹,滚柱为无螺旋升角的环槽结构,截面轮廓呈圆弧形,且滚柱在丝杠与螺母之间以行星状圆周装配在保持架中,保持架为沿圆周方向布置有若干向内的直槽笼孔。凸轮环除具有限制保持架轴向位移的功能外,其端面上有高度为一个螺距的凸台,其作用是协助滚柱完成复位动作。

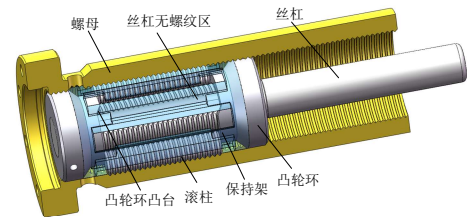


图 1 IRPRSM 结构图
Fig. 1 Structure of IRPRSM

IRPRSM 在工作时,螺母螺纹牙与滚柱环槽牙啮合并将动力源提供的驱动扭矩传给滚柱,滚柱在自转的同时绕丝杠公转,并进一步与丝杠螺纹牙啮合,使丝杠能够直线运动。当滚柱进入丝杠的无螺纹区后,在凸轮环凸台的作用下完成轴向复位,并重新进入啮合区实现连续传动。

为使前述运动关系成立,IRPRSM 的几何参数需满足如下约束:首先丝杠、滚柱与螺母取相同螺距,即 $p_S = p_R = p_N$;其次丝杠与螺母的螺纹头数一致,即 $n_S = n_N$;同时由于滚柱为无螺旋升角的环槽结构,故滚柱头数 $n_R = 0$;丝杠、滚柱与螺母的名义半径满足关系式

$$r_N^0 = r_S^0 + 2r_R^0 \quad (1)$$

式中: r_S^0 、 r_R^0 和 r_N^0 分别代表丝杠、滚柱和螺母的名义半径。丝杠与螺母的导程、螺旋升角与名义半径满足

$$L_S = 2\pi r_S^0 \tan \lambda_S \quad (2)$$

$$L_N = 2\pi r_N^0 \tan \lambda_N \quad (3)$$

式中: L_S 和 L_N 分别为丝杠和螺母的导程; λ_S 和 λ_N 分别表示 IRPRSM 丝杠和螺母在名义中径处的螺旋升角,由于滚柱的螺旋升角 $\lambda_R = 0$,故导程 $L_R = 0$ 。

2 误差源分析与螺旋曲面建立

IRPRSM 在制造与装配过程中,不可避免地会存在几何加工误差与装配误差,导致接触应力分布不均、传动精度降低以及使用寿命缩短等问题^[23]。结合

本文分析对象, 主要考虑以下四类典型加工误差。

2.1 偏心误差

偏心误差主要由于加工过程中基准不统一及精度控制不足导致, 如图 2 所示, 其中 o_i 表示零件螺纹牙螺旋线在理想状态下的理论轴心点, 而 o_i^{real} 是偏心误差作用下螺纹牙螺旋线的实际轴心点。其中下标 $i = S, R, N$, 分别表示丝杠、滚柱和螺母。 e_i 表示零件实际螺纹牙螺旋线轴心相对其理论轴心点的偏心量。 r_i^0 为名义中径, R_i 为实际啮合点与理论轴心点 o_i 之间的距离, θ_{xi} 表示理论轴心点与实际啮合点连线与 y_i 轴之间的夹角。

2.2 中径误差

中径是螺纹传动副中衡量丝杠或螺母与滚柱配合精度的最重要参数之一, 中径误差会直接改变丝杠或螺母与滚柱之间的径向间隙, 从而影响啮合点的位置与啮合半径。如图 3 所示。

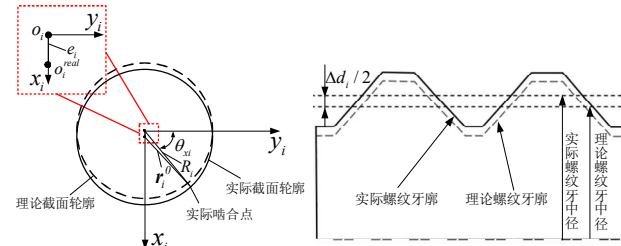


图 2 偏心误差

Fig. 2 Eccentricity error

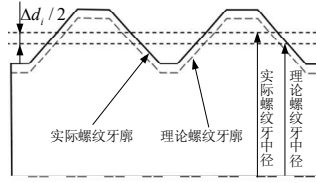


图 3 中径误差

Fig. 3 Pitch-diameter error

其中实线表示实际的螺纹牙廓型, 虚线表示理想状况下的理论螺纹牙廓型。理论螺纹牙中径与实际螺纹牙中径之间的误差在单侧螺纹牙上表示为 $\Delta d_i/2$ 。

2.3 牙型角误差

牙型角同样是决定螺纹齿廓形状与啮合接触状态的关键参数, 如图 4 所示。以中径螺旋线位置构建坐标系, β_i 为理论螺纹牙侧角, $\Delta\beta_i$ 表示由于加工误差导致的牙型偏差角, a_i 、 b_i 和 c_i 分别表示对应零件螺纹牙的牙顶高、牙底高以及半牙厚, r_{ia} 为 $w_i o_i v_i$ 坐标系纵轴到螺纹牙顶的距离。

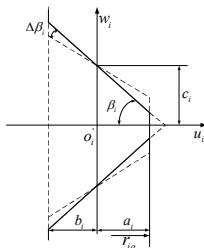
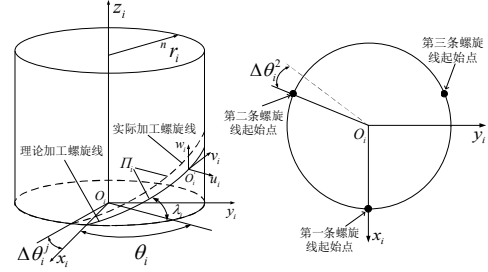


图 4 牙型角误差

Fig. 4 Thread-angle error

2.4 分头误差

在 IRPRSM 中, 由于丝杠与螺母常为多头螺纹结构, 故二者加工过程中易出现分头误差。如图 5(a) 为零件坐标系下的螺旋线角度示意图, 图 5(b) 以头数为 3 时的零件为例, 展示其螺旋线起始点位置。



(a) 零件坐标系下的螺旋线 (b) 螺纹起始点位置

图 5 螺纹分头误差

Fig. 5 Thread-start indexing error

其中 Π_i 为对应零件的螺旋线, 且实线表示理论加工螺旋线, 虚线表示实际加工螺旋线, $o_i' - u_i v_i w_i$ 为啮合点所在的截面坐标系, $\Delta\theta_i^j$ 表示第 j 条螺旋线对应的分头误差角, 右上标 $j = 1, 2, \dots, n$, n 为对应零件螺旋线总数, θ_i 为该条螺旋线在圆周方向上的理论起始到啮合点的相位。其中:

$$\begin{cases} \tan \lambda_i = L_i / (2\pi r_i^0) \\ L_i = n p_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_i 为零件的导程; p_i 为零件的螺距。

2.5 螺旋曲面建立

在建立 IRPRSM 的螺旋曲面方程前, 首先建立丝杠、滚柱和螺母对应啮合点在以各自螺纹牙螺旋线中径为原点的截面坐标系 $O_i' - u_i v_i w_i$, 如图 5(a) 所示。丝杠、滚柱和螺母的牙型轮廓在各自的截面坐标系中分别如图 6(a)、6(b)和 6(c)所示, Γ_{iT} 、 Γ_{iB} 分别表示对应零件牙型的上、下轮廓线。

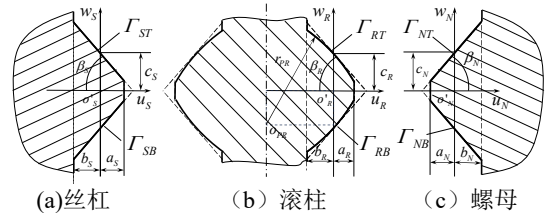


图 6 零件牙型轮廓

Fig. 6 Thread profiles of components

考虑牙型角误差后, 滚柱圆弧牙廓圆心坐标为:

$$u_{PR} = -r_{PR} \sin(\beta_R + \xi_{R0} \Delta\beta_R) \quad (5)$$

$$w_{PR} = -r_{PR} \cos(\beta_R + \xi_{R0} \Delta\beta_R) + c_R \quad (6)$$

式中, r_{PR} 为滚柱牙型圆弧半径, ξ_{R0} 为滚柱牙型角误差方向系数, 若牙型偏差后的圆弧轮廓与理想牙型

轮廓的偏差角 $\Delta\beta_R$ 在截面坐标系第二相位上是逆时针远离 w_R 轴的, 则定义变量 $\xi_{R0}=-1$, 反之取正值, 丝杠与螺母牙型角误差方向系数 ξ_{S0} 、 ξ_{N0} 的定义方法与滚柱一致, 同时变量 ξ 表示螺纹牙的上、下接触面。以滚柱为例, 其上啮合点 m_R 在滚柱螺纹牙截面坐标系中的位置向量为:

$$\mathbf{m}_R = \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ w_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'_R \\ 0 \\ \xi[w_{PR} + \sqrt{r_{PR}^2 - (u'_R - u_{PR})^2}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 u'_R 表示截面坐标系中啮合点在 u_R 方向上的坐标位置。为描述各零件在空间中的实际啮合位置, 建立如图 7 所示的全局坐标系 $O-XYZ$ 。其中坐标系 $o_S-x_S y_S z_S$ 、 $o_R-x_R y_R z_R$ 和 $o_N-x_N y_N z_N$ 分别为丝杠、滚柱和螺母的零件坐标系, γ_R^q 为第 q 根滚柱的自转姿态角 ($q=1, 2, \dots, n_{roll}$, n_{roll} 为滚柱总

个数), γ_S 为丝杠局部坐标系 Z 轴相对于全局坐标系的姿态角, γ_N 为螺母局部坐标系相对于全局坐标系绕 Z 轴的姿态角。

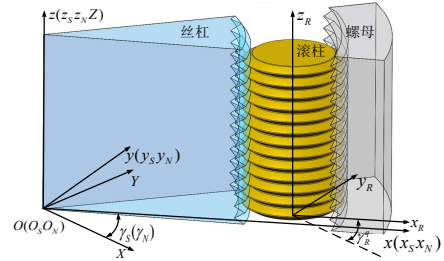


图 7 坐标系示意图

Fig. 7 Schematic of coordinate systems

现将前面截面坐标系中的啮合点坐标通过变换矩阵转换到零件坐标系, 再转换至全局坐标系。坐标变换等推导可参考文献[2]。最终可得到考虑加工误差后的丝杠、滚柱和螺母螺旋曲面方程, 以滚柱为例:

$$\mathbf{r}_R^{T/B} = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_R^q \cos \theta_R (u_R + R_R + \frac{\Delta d_R}{2}) - \sin \gamma_R^q \sin \theta_R (u_R + R_R + \frac{\Delta d_R}{2}) + \cos \varphi_q (r_S^0 + r_R^0) \\ \sin \gamma_R^q \cos \theta_R (u_R + R_R + \frac{\Delta d_R}{2}) + \cos \gamma_R^q \sin \theta_R (u_R + R_R + \frac{\Delta d_R}{2}) + \sin \varphi_q (r_S^0 + r_R^0) \\ \xi[w_{PR} + \sqrt{r_{PR}^2 - (u_R - u_{PR})^2}] + (k - \frac{1}{2})p \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, φ_q 表示第 q 个滚柱绕丝杠的公转角度, 且定义变量 ξ_S^j , 若丝杠第 j 头螺纹的误差 $\Delta\theta_S^j$ 在和螺纹旋向一致的路径上, 则此时 $\xi_S^j=-1$, 反之 ξ_S^j 取正。

3 啮合机理与间隙关系

3.1 啮合机理

IRPRSM 正确运行时, 需使丝杠、滚柱和螺母的螺旋曲面时刻保持啮合, 设任意两啮合曲面分别为 Π_m 和 Π_n , 其啮合点处的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_m$ 和 $\mathbf{r}_n$, 对应单位法向量分别为 $\mathbf{n}_m$ 和 $\mathbf{n}_n$ 。根据空间曲面啮合条件, 两曲面在啮合点处应满足位置矢量相差一个间隙向量, 且法向量共线, 则有 Π_m 和 Π_n 啮合条件:

$$\mathbf{r}_m(u_m, \theta_m) = \mathbf{r}_n(u_n, \theta_n) + \delta_{mn} \mathbf{e}_{mn} \quad (9)$$

$$\mathbf{n}_m(x_m, y_m, z_m) = \xi_{mn} \mathbf{n}_n(x_n, y_n, z_n) \quad (10)$$

其中 $\delta_{mn} \mathbf{e}_{mn}$ 为两曲面间隙, 系数 ξ_{mn} 表示两单位法向量在啮合点处“同向/反向”的关系。联立式(9)、(10)在全局坐标系下展开, 可得到含有 5 个未知量 u_m 、 θ_m 、 u_n 、 θ_n 和 δ_{mn} 的方程式(11), 求解该方程组即可获得两啮合曲面的接触位置及对应间隙。

$$\mathbf{F}(u_l, \theta_l, u_m, \theta_m, \delta_{mn}) = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5]^T = \mathbf{0} \quad (11)$$

图 8 是将图 7 中的 IRPRSM 端面简化后表示的螺纹啮合位置, 为便于理解这里仅绘出位于全局坐标系 X 轴正方向上的一根代表性滚柱, 且后续计算皆以该位置条件下的零件进行计算。

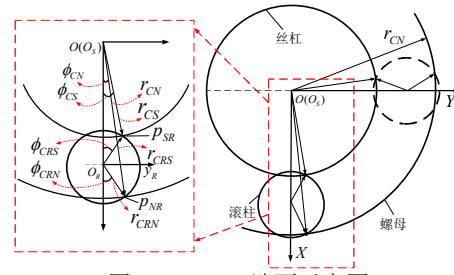


图 8 IRPRSM 端面示意图

Fig. 8 End-view schematic of IRPRSM

虚线圆弧表示该代表性滚柱绕丝杠轴线转动到 Y 方向时的状态。其中 p_{SR} 和 p_{NR} 为滚柱分别与丝杠和螺母啮合时, 啮合点在全局坐标系 $O-XYZ$ 中平面 XOY 上的投影, r_{CS} 为丝杠与滚柱啮合时丝杠的啮合半径, 该啮合半径为从丝杠坐标系原点到啮合点的投影距离; r_{CN} 为螺母的啮合半径; r_{CRS} 为滚柱在丝杠侧的啮合半径; r_{CRN} 为滚柱在螺母侧的啮合半径; ϕ_{CS} 为丝杠啮合偏角; ϕ_{CRS} 为滚柱在丝杠侧啮合偏角, ϕ_{CN} 为螺母侧啮合偏角; ϕ_{CRN} 为滚柱在螺母侧啮合偏角。丝杠、滚柱和螺母三者均假设认为在该

时刻不存在由自转导致的姿态变化, 即 $\gamma_i=0$ 。

3.2 啮合方程

根据两啮合曲面在接触点处位置矢量重合、法向量共线的空间啮合条件以及图 8 端面示意图, 将

$$\begin{cases} r_{CS} \cos \phi_{CS} = r_S^0 + r_R^0 - r_{CRS} \cos \phi_{CRS} + \delta_{SR} e_{SR}^x \\ r_{CS} \sin \phi_{CS} = r_{CRS} \sin \phi_{CRS} + \delta_{SR} e_{SR}^y \\ c_S - u_S \tan(\beta_S + \xi_{S0} \Delta \beta_S) + \frac{L_S}{2\pi} \phi_{CS} = -w_{PR} - \sqrt{r_{PR}^2 - (u_R - u_{PR})^2} + [p + (\xi_S^j \Delta \theta_S^j + \xi_S^{j'} \Delta \theta_S^{j'}) \frac{L_S}{2\pi}] / 2 - \delta_{SR} e_{SR}^z \\ \sin \phi_{CS} \tan \lambda_{CS} + \xi \tan(\beta_S + \xi_{S0} \Delta \beta_S) \left(\frac{\partial R_S \sin \phi_{CS}}{\partial \theta_S r_{CS}} + \cos \phi_{CS} \right) = -\xi \frac{u_R - u_{PR}}{\sqrt{r_{PR}^2 - (u_R - u_{PR})^2}} \left(\frac{\partial R_{R1} \sin \phi_{CRS}}{\partial \theta_R r_{CRS}} - \cos \phi_{CRS} \right) \\ -\cos \phi_{CS} \tan \lambda_{CS} - \xi \tan(\beta_S + \xi_{S0} \Delta \beta_S) \left(\frac{\partial R_S \cos \phi_{CS}}{\partial \theta_S r_{CS}} - \sin \phi_{CS} \right) = -\xi \frac{u_R + u_{PR}}{\sqrt{r_{PR}^2 - (u_R - u_{PR})^2}} \left(\frac{\partial R_{R1} \cos \phi_{CRS}}{\partial \theta_R r_{CRS}} + \sin \phi_{CRS} \right) \end{cases} \quad (12)$$

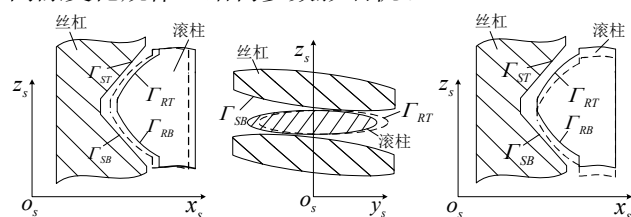
式中, 当第 j' 条螺纹线的分头误差 $\Delta \theta_S^{j'}$ 在和螺旋线旋向一致的路径上时取 $\xi_S^{j'} = -1$, 反之取正, 且 j 与 j' 的关系为

$$j' = j - 1 (j > 1), j' = n (j = 1) \quad (13)$$

式中, n 为头数。

3.3 间隙关系

由于两啮合螺旋曲面在接触点处需满足位置矢量重合和法向量共线条件, 而实际啮合过程中接触路径并不唯一, 零件间会存在一定间隙。该间隙可分解为径向、横向和轴向 3 个方向, 如图 9 所示。其中, 轴向间隙直接影响 IRPRSM 的回程误差、定位精度、传动刚度和啮合稳定性, 因此, 后文在间隙分析处定义 $e_{mn} = [0 \ 0 \ 1]^T$, 并重点聚焦轴向方向的间隙变化规律、结构参数影响机理。



(a) 径向 (b) 横向 (c) 轴向

图 9 丝杠与滚柱在 3 个方向下的接触方式

Fig. 9 Contact modes of the screw and roller in three directions

4 误差对啮合特性影响分析

4.1 模型验证

为验证本文模型的正确性, 本文将各误差项设为 0, 使模型退化为理想啮合几何模型, 并将所得计算结果与已有研究结果进行对比分析。表 1 为一组 IRPRSM 的基本结构参数, 通过对比验证, 本文模型

丝杠、滚柱和螺母的螺旋曲面方程代入上述接触条件, 可得到丝杠-滚柱侧啮合方程为式 (12), 滚柱-螺母侧啮合方程同理可得这里不再展示:

在零误差极限下能够正确回归已有理想啮合模型。同时由于含误差模型是在相同数学模型基础上通过引入误差参数扩展得到, 因此该对比结果能够说明本文整体模型的正确性。

表 1 IRPRSM 结构参数

Tab. 1 Structural parameters of IRPRSM

参数	符号	丝杠	滚柱	螺母
名义半径	r_i^0/mm	30	5	40
牙顶高	a_i/mm	0.4	0.4	0.4
牙底高	b_i/mm	0.55	0.55	0.55
半牙厚	c_i/mm	0.48	0.48	0.50
头数	n_i	8	—	8
牙侧角	$\beta_{ti}/^\circ$	45	45	45
螺距	P/mm	2	2	2
牙型圆弧半径	r_{PR}/mm	—	7.071	—

根据方程组(12)和表 1, 可计算得到丝杠-滚柱侧的啮合半径与啮合偏角 r_{CS} 、 r_{CRS} 、 ϕ_{CS} 、 ϕ_{CRS} , 和轴向间隙 δ_{SR} ; 同理可得滚柱-螺母侧的啮合半径与偏角 r_{CRN} 、 r_{CN} 、 ϕ_{CRN} 、 ϕ_{CN} , 以及二者之间轴向间隙 δ_{NR} 。如表 2 所示, 将本文结果与文献[17]中得到的结果进行比较。

通过对比得到丝杠-滚柱侧的啮合半径和啮合偏角的相对误差均小于 1‰, 轴向间隙 δ_{SR} 的相对误差为 1.60%。滚柱-螺母侧的啮合半径误差在 1‰之内。需要指出, 文献[17]的研究对象为环形牙滚柱丝杠副 (RRSM), 并非本文的 IRPRSM, 文献[17]中 RRSM 的丝杠和滚柱结构与本文 IRPRSM 丝杠和滚柱结构一致, RRSM 的螺母采用无螺旋升角的环形牙结构, 与本文螺母存在螺旋升角结构有差异, 这也是二者在滚柱-螺母侧啮合偏角和轴向间隙存在较大差异的原因。二者对比验证了本文模型的正确性, 同时将表 2 得到的数据带入啮合三角形, 符合啮合三角形条件。

表 2 不同啮合模型对比结果

Tab. 2 Comparison results of different meshing models

啮合点位置参数与轴向 间隙	计算结果		差异
	本文	文献[17]	
丝杠和滚柱	丝杠啮合半径 r_{CS}/mm	30.00	30.006 (0.01‰)
	丝杠啮合偏角 $\phi_{CS}/^\circ$	0.693	0.693 (0.58‰)
	滚柱在丝杠侧啮合 半径 r_{CRS}/mm	5.009	5.009 0
	滚柱在丝杠侧啮合 偏角 $\phi_{CRS}/^\circ$	4.157	4.157 (0.10‰)
	丝杠和滚柱轴向间 隙 δ_{SR}/mm	0.024	0.025 (1.60‰)
	螺母啮合半径 r_{CN}/mm	39.99	40.000 (0.10‰)
	螺母啮合偏角 $\phi_{CN}/^\circ$	0.405	0 -0.4052
螺母和滚柱	滚柱在螺母侧啮合 半径 r_{CRN}/mm	5.002	5.000 (0.56‰)
	滚柱在螺母侧啮合 偏角 $\phi_{CRN}/^\circ$	3.240	0 -3.2408
	滚柱和螺母轴向间 隙 δ_{NR}/mm	0.009	0.020 -0.011 (55.00‰)

4.2 偏心误差影响

在保持其余参数不变的条件下,本节首先分析偏心误差对啮合特性及轴向间隙的影响,并以图 8 中 X 方向滚柱为研究对象。

在分析丝杠与滚柱偏心误差时,误差方向不同会导致结果不同,因此对比丝杠与滚柱的偏心误差在 X 方向和 Y 方向这两个极限位置时对轴向间隙的变化如图 10 所示。

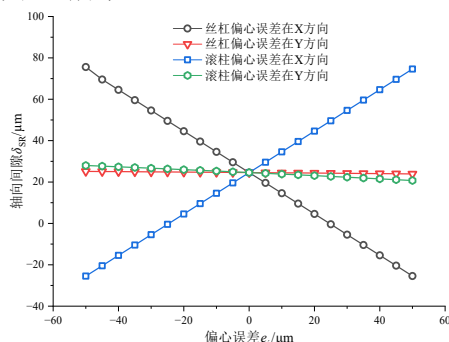


图 10 偏心误差对轴向间隙的影响规律

Fig. 10 Effect of eccentricity error on axial clearance

图 10 表明,丝杠偏心误差在 X 方向与轴向间隙呈近似线性负相关,滚柱偏心误差在 X 方向与轴向间隙呈显著正相关,而二者在 Y 方向对轴向间隙影响较小,说明 X 方向偏心误差更为敏感。因此,后续偏心误差分析均取 X 方向工况。

根据图 10 及文献[21]中给出的偏心误差典型容差范围,进一步分析当滚柱偏心误差为 $-10\text{ }\mu\text{m}$ 、丝杠偏心误差为 $+10\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同头数条件下 IRPRSM 啮合特性的变化规律。计算结果表明,在滚柱绕丝杠公转一周过程中,丝杠侧与滚柱侧啮合半径均随公转角呈周期变化,且随着丝杠头数增加,变化频率同步提高,其中滚柱侧啮合半径的波动更为明显。

图 11 描述了不同头数丝杠在偏心误差作用下的轴向间隙变化情况,且进一步表明,不同头数条件下轴向间隙随转角存在明显波动,这将直接影响换向阶段接触状态的建立过程,从而使回程误差和动态响应呈现更复杂的变化规律。已有研究表明[24],偏心误差还会导致滚柱间载荷分配随转角发生周期变化,并可能引起局部过载、磨损加剧及寿命缩短。

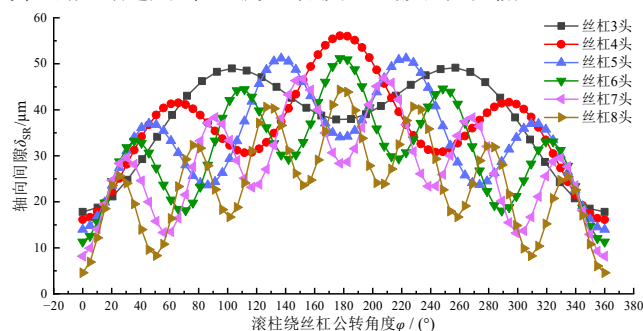


图 11 不同头数丝杠在偏心误差作用下的轴向间隙变化

Fig. 11 Variation of axial clearance under eccentricity error for screws with different numbers of starts

偏心误差的本质是使螺纹牙螺旋线的实际轴线偏离理论轴线,从而改变接触副的实际相对位置。沿中心连线方向的偏移会更直接地改变两零件间距,故 X 方向偏心误差对轴向间隙更敏感;而随着滚柱绕丝杠公转,偏心方向在局部接触区域中的作用会周期性重复出现,且丝杠头数越多,这种波动越频繁。

4.3 中径误差影响

从结构变化本身来看,由于滚柱牙型轮廓为圆弧状,滚柱中径变化会直接引起接触偏移,因此对啮合点位置影响更明显;而丝杠中径误差主要表现为牙廓沿径向平移,对接触点位置不产生影响。图 12 描述了当滚柱存在中径误差时,随着中径误差的改变对接触位置的影响规律。

当 IRPRSM 的螺母持续正向旋转运动时,丝杠和滚柱的啮合点位于靠近中径一侧位置;当反方向旋转运动时,啮合点位置会落在与丝杠和滚柱轴线连线 $y=0$ 对称的另一侧位置。随着误差从 -0.03 mm 变化到 $+0.03\text{ mm}$,啮合点位置逐渐靠拢向左侧(丝杠侧),表现出啮合点沿 X 轴负方向,逐渐靠近丝杠螺纹牙小径的趋势。

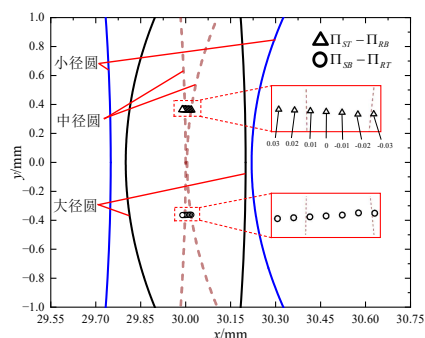


图 12 不同滚柱中径误差下的啮合位置

Fig. 12 Meshing positions under different roller pitch-diameter errors

由图 13 可知, 无论中径误差存在于丝杠还是滚柱上, 随着误差由负值逐渐变化到正值, 轴向间隙均呈现明显的下降趋势。同时从图 13 中可以看出在 ± 0.03 mm 的相同的误差幅值范围下, 二者的差值不超过 $2 \mu\text{m}$, 表明二者的中径误差对间隙的影响近乎相同。丝杠与滚柱中径误差对轴向间隙的影响可以为实际加工与装配提出“成对补偿策略”, 通过丝杠与滚柱误差大小的互补实现轴向间隙的控制, 在不提升零件加工精度的前提下, 能够有效提升 IRPRSM 装配的一致性和运行的稳定性。

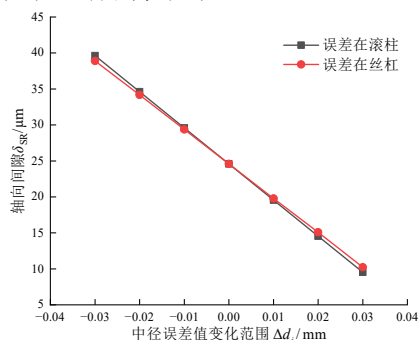


图 13 中径误差对轴向间隙的影响

Fig. 13 Effect of pitch diameter error on axial clearance

4.4 牙型角误差影响

图 14 表示了当丝杠与滚柱存在牙型角误差时的啮合位置。图 14 右上侧虚线框中, 正方形表示当滚柱不存在牙型角误差时啮合位置随着丝杠牙型角误差变化而变化的情况, 三角形表示丝杠无牙型角误差而滚柱存在牙型角误差时啮合位置变化的情况。图 14 中间的虚线框表示丝杠与滚柱同时存在牙型角误差且误差相同时的啮合情况。

关联二者的变化规律可知, 若丝杠或滚柱的牙型角存在误差时会导致啮合点在径向上偏移; 当丝杠与滚柱的牙型角误差存在差值时, 啮合点会发生横向偏移, 具体表现为: 丝杠牙侧角大于滚柱牙侧角时, 啮合点向丝杠牙底靠近, 且差值越大越靠近; 反

之, 啮合点则更靠近滚柱牙底。在实际加工与装配中更应关注两啮合零件牙型角之间的误差差值, 将二者差值控制在较小范围内可以确保啮合连续与稳定。

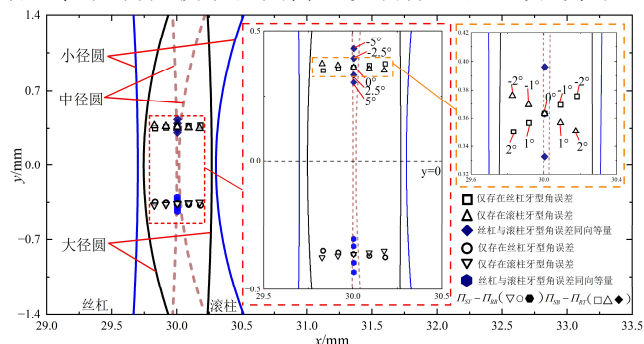


图 14 不同牙型角误差下的啮合位置

Fig. 14 Meshing positions under different thread-angle errors

图 14 中的误差模式各自对应的轴向间隙变化情况如图 15 所示, 图 15 给出了仅丝杠存在牙型角误差、仅滚柱存在牙型角误差以及蓝色曲线表示发热丝杠与滚柱牙型角误差同向等量变化时的轴向间隙, 即 $\Delta\beta_S = \Delta\beta_R$, 对于该曲线, 横坐标表示丝杠与滚柱牙型角误差的共同取值。

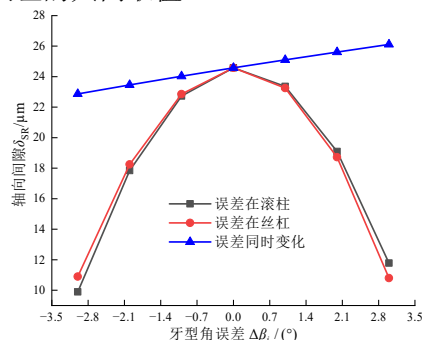


图 15 牙型角误差对轴向间隙的影响

Fig. 15 Influence of thread-angle error on axial clearance

图示结果表明, 当仅丝杠或仅滚柱存在牙型角误差时, 两条曲线总体呈现明显的“近似对称上凸曲线”, 轴向间隙处于峰值 $24.58 \mu\text{m}$; 随着误差角度向 $\pm 3^\circ$ 增加, 间隙值迅速下降至约 $10\text{--}12 \mu\text{m}$ 。而当误差在丝杠与滚柱上联合变化时, 对轴向间隙的影响呈上升趋势且缓慢变化, 起始点间隙 $22.87 \mu\text{m}$, 至 $+3^\circ$ 时上升至 $26.11 \mu\text{m}$, 表明当误差同步变化时间隙反而相对稳定。因此在加工配对过程中, 即使存在一定牙型角误差, 若滚柱与丝杠误差方向一致, 同样能够缓解由于牙型角误差导致的间隙变化太大的问题。故工程上应优先控制两者之间的误差差值, 而非孤立控制单边精度。

4.5 分头误差影响

为探究分头误差对啮合特性的影响, 以图 7 中滚柱上的坐标系为基准坐标系对丝杠、滚柱和螺母

螺纹牙进行统一编号如图 16 所示。其中定义滚柱上 x_R 轴线所在的螺纹牙为滚柱编号为 1 的螺纹牙, 随着 z_R 轴线方向依次增大, 其中 1 号螺纹牙上轮廓线为 Γ_{RT}^1 , 下轮廓线为 Γ_{RB}^1 。丝杠、螺母编号规则与滚柱相同, 三者最大编号分别为 $k_S^{\max}$ 、 $k_R^{\max}$ 、 $k_N^{\max}$ 。

IRPRSM 中滚柱无螺旋升角, 且无螺纹区布置在丝杠上, 故滚柱在丝杠侧的啮合区域相对受限, 表现为滚柱主要在丝杠的局部螺纹区间参与啮合, 而滚柱在螺母侧的啮合沿螺母螺纹方向分布。因此, 在相同工况下, 滚柱在丝杠侧的接触区域更为集中。

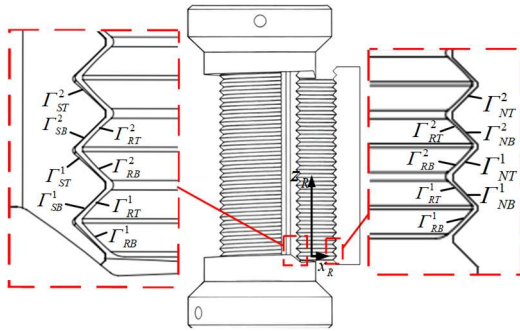


图 16 丝杠、滚柱和螺母螺纹牙编号规则

Fig. 16 Numbering rule of screw, roller, and nut threads

下面以 3 头螺纹为例, 当丝杠螺纹的分头误差为 $\Delta\theta_S^1=0^\circ$ 、 $\Delta\theta_S^2=0.05^\circ$ 、 $\Delta\theta_S^3=-0.1^\circ$, 螺母分头误差分别为 $\Delta\theta_N^1=-0.06^\circ$ 、 $\Delta\theta_N^2=0.04^\circ$ 、 $\Delta\theta_N^3=0.12^\circ$ 时, 丝杠侧与滚柱侧螺纹牙之间的轴向间隙见图 17 所示。

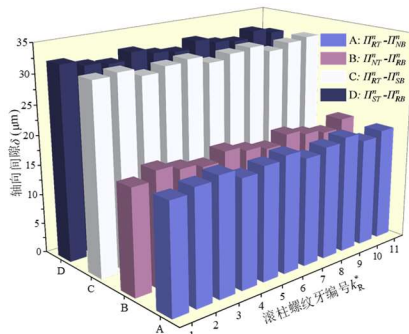


图 17 分头误差对不同啮合面轴向间隙的影响

Fig. 17 Effect of indexing error on axial clearance between different meshing surfaces

图 17 中, 横坐标 k_R^* 为滚柱螺纹牙编号 (* = 1、2、3.....), 柱高表示对应配对啮合面的轴向间隙值。图例中 $\Pi_{RT}^n - \Pi_{NB}^n$ 为滚柱上轮廓面与螺母下轮廓面配对形成的轴向间隙, 其余图例同理。在保持其他参数不变时, 螺纹分头误差不会改变滚柱两侧的轴向接触位置, 但会直接改变对应螺纹牙之间的轴向间隙。

通过分析图 17 可知, 当丝杠或螺母存在正向分头误差时, 滚柱上螺旋曲面与配合螺纹面形成的轴向间隙整体减小, 而滚柱下螺旋曲面与配合螺纹面

形成的轴向间隙相应增大, 当误差为负值时, 上述规律相反。已有研究表明^[19,21], 机构受载后各螺纹牙接触对在轴向满足变形协调关系, 螺纹牙变形和接触变形会改变接触位置与载荷分布; 同时, 当某接触对对应的求解载荷为负时, 说明该处已不再啮合接触。因此, 可推得分头误差引起的上下侧间隙重新分配会导致受载时不同螺纹面之间的接触建立顺序发生变化。在受载情况下, 间隙更小的一侧会优先进入接触并承担更大载荷, 且当受载较小时, 间隙值较大的螺纹牙配合对可能存在不受力的情况。

此外, 丝杠传动副运行过程中的摩擦生热及界面换热条件会引起温升和热变形, 进而改变零件实际尺寸与相对啮合位置^[25]。鉴于本文主要关注加工形成的初始几何误差, 故未进一步展开热-结构耦合分析。

5 结论

(1) 建立了基于螺旋滚道参数化与曲面接触条件的 IRPRSM 统一方程, 推导出误差作用下实际啮合位置与轴向间隙的解析式; 在零误差退化情形下, 与已有模型对比, 验证了模型的正确性。

(2) 偏心误差会导致机构在运行时发生周期性波动, 啮合半径与轴向间隙随丝杠转角呈周期性波动变化, 且随头数增加, 周期性波动频率逐渐提高。

(3) 丝杠和螺母存在中径误差时, 不会改变啮合点位置, 滚柱存在中径误差时, 啮合点在端面投影中会随滚柱中径误差变化发生规律性偏移。轴向间隙会随中径误差变化呈单调性变化, 在相同误差幅值范围内, 两者对轴向间隙的影响接近, 在 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 误差范围内, 二者引起的轴向间隙差值不超过 $2 \mu\text{m}$ 。

(4) 牙型角误差会同时改变啮合点位置与间隙, 当仅丝杠或仅滚柱存在牙型角误差时, 轴向间隙呈近似对称峰值规律, 并在 0° 时最大。当丝杠与滚柱牙型角误差同向变化时, 对轴向间隙的影响变小。因此工程上宜优先控制两零件牙型角的差值而非孤立提高单一零件的加工精度。

(5) 分头误差虽不改变轴向接触位置, 但会改变不同螺纹牙间的上下侧间隙, 分头误差为正时, 滚柱上螺旋曲面与配合螺纹面形成的轴向间隙整体减小, 而滚柱下螺旋曲面对应的轴向间隙相应增大; 分头误差为负时, 上述规律相反。受载时, 间隙较小的一侧更易优先进入接触并承担更大载荷。

综上, 本文揭示了不同误差对 IRPRSM 啮合位置与轴向间隙的作用规律, 可为人形机器人关节线性执行器中 IRPRSM 的关键公差确定、误差互补配对及高精度装配提供理论依据。后续将进一步考虑

热变形、受载变形及多源误差耦合作用, 并结合人形机器人关节典型工况开展传动精度与动态性能研究。

参考文献:

- [1] 周雪峰, 孙广彬, 刘晓光, 等. 应用扩展零力矩点预观控制和分解动量控制的仿人机器人全身运动规划方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 58-63.
Zhou Xuefeng, Sun Guangbin, Liu Xiaoguang, et al. A whole-body motion planner for humanoid robots using EZMP preview control and resolved momentum control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 58-63.
- [2] 乔冠, 刘付乐, 唐术锋, 等. 循环式行星滚柱丝杠副啮合机理与接触特性分析[J]. 机械工程学报, 2025, 61(5): 202-213.
Qiao Guan, Liu Fule, Tang Shufeng, et al. Meshing theory and contact characteristics analysis of the recirculating planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(5): 202-213.
- [3] Zhang Jianxin, Liu Muiyang, Deng Wenzhu, et al. Research on electro-mechanical actuator fault diagnosis based on ensemble learning method[J]. International Journal of Hydromechatronics, 2024, 7(2): 113-131.
- [4] Wang Chang, Yan Jun, Zhang Tao, et al. Multi-source thread deformation analysis in planetary roller screws[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 305: 110770.
- [5] 马腾龙, 马尚君, 吴林萍, 等. 行星滚柱丝杠螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触载荷特性[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 11-21.
Ma Tenglong, Ma Shangjun, Wu Linping, et al. Dynamic contact load characteristics of synchromesh between screw pair and gear pair in the planetary roller screw[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 11-21.
- [6] 乔冠, 罗宇, 谢海波, 等. 反向循环式行星滚柱丝杠副设计与动力学分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2026, 54(4): 56-68.
Qiao Guan, Luo Yu, Xie Haibo, et al. Design and dynamic analysis of inverted recirculating planetary roller screw mechanism[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2026, 54(4): 56-68.
- [7] 李宗学, 岳之栋, 刘江, 等. 不同进给速度对加工中心用滚珠丝杠进给系统热变形的影响[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 38-43.
Li Zongxue, Yue Zhidong, Liu Jiang, et al. Influence of different feed speeds on thermal deformation of ball screw feed system used in machining center[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology(Natural Science Edition), 2025, 44(1): 38-43.
- [8] Cai Wei, Fu Xiaojun, Ma Shangjun, et al. Meshing characteristics analysis of planetary roller screw mechanism with misalignment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(9): 3794-3806.
- [9] Zhang Changhui, Fan Yuanxun, Zhang Ming, et al. Kinematic analysis of inverted planetary roller screw considering skew error[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2760(1): 012036.
- [10] Qiao Guan, Liao Rong, Guo Shijie, et al. Design and dynamic analysis of the recirculating planetary roller screw mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 87.
- [11] Du Xing, Lu Shiyi, Tang Rui, et al. An efficient method for designing high-performance planetary roller screw mechanism with low contact stress[J]. Tribology International, 2023, 187: 108709.
- [12] He Huilin, Wei Peitang, Liu Huaiju, et al. Three-dimensional parametric contact analysis of planetary roller screw mechanism and its application in grouping for selective assembly[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2024, 19(1): 2.
- [13] 付晓军, 李欣, 马尚君, 等. 柱销式双螺母行星滚柱丝杠预紧机理研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 122-132.
Fu Xiaojun, Li Xin, Ma Shangjun, et al. Preload mechanism of the double-nut planetary roller screw mechanism with pins[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(3): 122-132.
- [14] 付晓军, 徐烨, 刘更, 等. 考虑滚柱偏斜的行星滚柱丝杠载荷分布计算方法[J]. 机械工程学报, 2024, 60(13): 247-256.
Fu Xiaojun, Xu Ye, Liu Geng, et al. The calculation method for the load distribution in the planetary roller screw mechanism with the roller deviation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(13): 247-256.
- [15] Fu Xiaojun, Li Xin, Ma Shangjun, et al. A multi-roller static model of the planetary roller screw mechanism considering load sharing[J]. Tribology International, 2022, 173: 107648.
- [16] Yao Qin, Liu Yongshou, Zhang Mengchuang, et al. Investigation on the uncertain factors of the elastic-plastic contact characteristics of the planetary roller screw

- mechanism[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(5): 1795-1806.
- [17] 付晓军, 李欣, 马尚君, 等. 环形牙滚柱丝杠啮合机理研究[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(4): 670-678.
- 付晓军, 李欣, 马尚君, 等. 环形牙滚柱丝杠啮合机理研究[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(4): 670-678.
- [18] 乔冠, 刘更, 马尚君. 行星滚柱丝杠副主曲率计算与接触特性分析[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(21): 140-148.
- Qiao Guan, Liu Geng, Ma Shangjun. Principal curvature calculation and contact characteristics analysis of the planetary roller screw mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(21): 140-148.
- [19] 吴林萍, 马尚君, 许千斤, 等. 考虑弹性变形的行星滚柱丝杠接触特性[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(5): 130-141.
- Wu Linping, Ma Shangjun, Xu Qianjin, et al. Contact characteristics of planetary roller screw mechanism considering elastic deformation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(5): 130-141.
- [20] Cheng Zhenwen, Zu Li, Xing Mingcai, et al. Effects of eccentric errors on sliding velocity and accumulative wear depth of planetary roller screw mechanism[J]. *Journal of Tribology*, 2024, 146(8): 081703.
- [21] 刘柱. 标准型行星滚柱丝杠副载荷分布及动态特性分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [22] 刘思奇, 魏沛堂, 胡瑞, 等. 行星滚柱丝杠螺纹加工误差统计分析 with 国内外对比研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(8): 1713-1727.
- Liu Siqi, Wei Peitang, Hu Rui, et al. Statistical analysis of planetary roller screw thread machining errors and comparative study at home and abroad[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(8): 1713-1727.
- [23] Ma Shangjun, Wu Guanyu, Zhang Jianxin, et al. A comprehensive error analysis of the planetary roller screw mechanism[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(5): 1-13.
- [24] Hu Rui, Wei Peitang, Liu Huaiju, et al. Investigation on load distribution among rollers of planetary roller screw mechanism considering machining errors: analytical calculation and machine learning approach[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 185: 105322.
- [25] 王昊, 姜歌东, 杨汉博, 等. 考虑接触热阻与对流换热系数修正的滚珠丝杠副温升建模与分析[J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(7): 77-86.
- Wang Hao, Jiang Gedong, Yang Hanbo, et al. Modeling and analysis of temperature rise in ball screw pairs considering thermal contact resistance and convective heat transfer coefficient corrections[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(7): 77-86.

(编辑 刘杨 陶晴)