

反向式行星滚柱丝杠副的动力学建模及传动特性研究

冯卫东¹ 王世松² 邓星桥³ 吴贵成⁴ 曾李元² 蔡大静⁵

(1. 四川普什宁江机床有限公司, 成都 611830)

(2. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 成都 610059)

(3. 成都理工大学 机电工程学院, 成都 610059)

(4. 四川航天烽火伺服控制技术有限公司, 成都 611130)

(5. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵阳 550081)

摘要:【目的】反向式行星滚柱丝杠副是一种具备高精度、大负载、长寿命的新型精密传动装置, 多零件、多点接触、多运动副的特点导致其动力学特性难以被准确预测。【方法】针对这一问题, 准确考虑螺母、滚柱、丝杠及保持架之间的复杂接触与运动关系, 建立了基于RecurDyn软件的反向式行星滚柱丝杠副动力学模型; 在验证模型有效性的基础上, 定量分析了螺母转速与丝杠负载对其传动特性的影响规律。【结果】结果表明, 滚柱与丝杠、螺母之间的平均接触力与螺母转速、丝杠负载均成正相关。受各零件之间接触变形的影响, 滚柱与丝杠的啮合轮齿间及滚柱左、右轴颈与保持架内孔之间均存在载荷分配不均现象。研究可为反向式行星滚柱丝杠副的结构设计与优化提供支撑。

关键词: 反向式行星滚柱丝杠副; 动力学分析; 传动特性; 仿真建模

中图分类号: TH132 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.11.004

0 引言

行星滚柱丝杠副(Planetary Roller Screw Mechanism, PRSM)是一种新型精密重载传动装置, 主要由螺母、滚柱、丝杠、保持架等4种核心零件组成。相较于传统滚珠丝杠副, PRSM具有高精度、大负载、长寿命的传动优势^[1-3]。反向式行星滚柱丝杠副(Inverted Planetary Roller Screw Mechanism, IPRSM)是PRSM的代表结构形式, 依靠滚柱、丝杠、螺母之间的螺纹啮合以及滚柱与丝杠端部的齿轮啮合, 将螺母的旋转运动转化为丝杠的直线运动^[4], 因其大推程、小体积、结构紧凑的特点, 被广泛应用于精密数控机床、航空航天和工业机器人等现代工业领域^[5]。

PRSM动力学特性预测是该领域的重要研究方向^[6]。通过对PRSM动力学特性的合理预测, 可定量分析设计参数对传动误差、负载能力、响应速度等性能指标的影响规律, 从而为实际生产制造前的结构优化设计提供重要理论基础^[7-9]。因此, 如何实现PRSM动力学特性的准确预测, 受到了国内外相关学者的广泛关注与研究^[10-12]。

PRSM动力学特性的预测通常基于动力学建模实现。党金良等^[13]基于Adams软件构建了IPRSM的动力学模型, 研究了不同外部载荷对各零件间接触力的影响规律。马尚君等^[14]考虑零件接触变形引起的滚柱节圆偏移, 对比分析了IPRSM中各部件理论与实际运动速度的差异。FU等^[15]推导了基于拉格朗日方法和牛顿第二定律的PRSM动力学模型, 分析了结构参数对其动力学特性的影响。XING等^[16]考虑丝杠、滚柱和螺母间的接触特性, 分析了接触变形对零件滑动速度的影响规律。李欣等^[17]考虑各零件间摩擦因数的影响, 定量分析了多级PRSM的动力学特性。

上述研究为PRSM动力学建模提供了重要的理论支撑。由于PRSM多零件、多点接触、多运动副的传动特点, 在建模过程中需对各零件间的接触或运动关系进行简化处理, 从而导致理论与实际分析结果存在一定的偏差^[18-19]。因此, 有必要进一步提出高精度、高可靠性的PRSM动力学建模方法, 尤其是针对IPRSM这类已被广泛应用的PRSM。

本文以某型IPRSM为例, 提出一种基于RecurDyn软件的IPRSM动力学建模方法。通过精确考虑螺母、

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A20619, 52175039)

作者简介: 冯卫东, 男, 1985年生, 河南潢川人, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为机械设计及其自动化; fwd928@126.com。

邓星桥(通信作者), 男, 1982年生, 四川宜宾人, 博士, 教授, 青年长江学者; 主要研究方向为精密/超精密传动基础零部件、驱传一体化技术的基础理论与工程应用; dengxingqiao19@cdut.edu.cn。

引用格式: 冯卫东, 王世松, 邓星桥, 等. 反向式行星滚柱丝杠副的动力学建模及传动特性研究[J]. 机械传动, 2025, 49(11): 35-41.

FENG Weidong, WANG Shisong, DENG Xingqiao, et al. Study on dynamic modeling and transmission characteristics of inverted planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(11): 35-41.

滚柱、丝杠及保持架之间的接触与运动关系,实现IPRSM动力学行为的准确预测;在验证模型有效性的基础上,定量分析了工况参数对其传动特性的影响规律。本研究可为IPRSM的结构设计与优化提供支撑。

1 结构与传动原理

图1所示为某型IPRSM的三维模型,包含螺母、滚柱、丝杠、保持架、垫片、锁紧螺母、轴套等零件。其中,垫片、锁紧螺母、轴套用于保持架的限位。螺母、滚柱、丝杠的主要设计参数如表1所示。

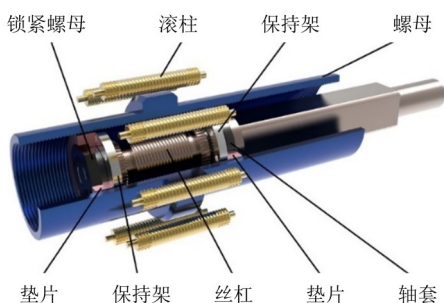


图1 IPRSM的三维模型

Fig. 1 3D model of the IPRSM

表1 IPRSM的设计参数

Tab. 1 Design parameters of the IPRSM

零件	中径/mm	螺距/mm	头数	齿数	模数/mm
丝杠	22.5	1.5	3	45	0.5
螺母	37.5	1.5	3		
滚柱	7.5	1.5	1	15	0.5

在传动过程中,螺母作为主动件,只存在相对于轴线的转动;丝杠作为从动件,只存在沿轴线的移动;滚柱作为中间构件,在螺母、丝杠、保持架的共同作用下,同时存在着自转与公转,并与丝杠一同沿轴线移动。由文献[20]可知,忽略各零件间的接触变形与加工误差,螺母转动角速度 ω_N 与滚柱公转角速度 ω_P 、自转角速度 ω_R 的关系分别为

$$\omega_P = \frac{k_m + 2}{2(k_m + 1)} \omega_N \quad (1)$$

$$\omega_R = \frac{k_m(k_m + 2)}{2(k_m + 1)} \omega_N \quad (2)$$

式中, k_m 为丝杠节圆直径 d_s 与滚柱节圆直径 d_r 之比,即

$$k_m = \frac{d_s}{d_r} \quad (3)$$

进一步的,由于滚柱与丝杠具有相同的螺旋升角,且相对于丝杠无轴向位移,则可将螺母转角与丝杠直线位移间的关系表示为

$$L_s = \frac{\omega_N t}{2\pi} n_N P \quad (4)$$

式中, L_s 为丝杠直线位移; t 为时间; n_N 与 P 分别为螺母的螺纹头数和螺距。式(4)两边对 t 求导,可将

丝杠的移动速度 v_{sz} 表示为

$$v_{sz} = \frac{\omega_N}{2\pi} n_N P \quad (5)$$

式(1)~式(5)所示理论参数将用于后续动力学模型的有效性验证。

2 动力学建模过程

利用图1所示的IPRSM三维模型,建立基于RecurDyn软件[21]的多体动力学模型,并验证其有效性。建模步骤主要由运动副设置、接触设置、转速及负载施加3部分组成。

2.1 运动副设置

在IPRSM的运行过程中,运动及动力主要依靠各零件间的接触来传递。其中,螺母端由输入电动机带动旋转,丝杠端用于连接外部构件以实现直线运动。因此,可分别设置螺母与丝杠相对于全局坐标系的转动副和移动副,用以约束其对应的自由度。此外,垫片、锁紧螺母、轴套等零件与丝杠间保持相对固定,可用固定副限制其与丝杠的相对运动。综上,在各零件间设置的运动副如表2所示。

表2 运动副的设置

Tab. 2 Setting of kinematic pairs

参考对象	运动零件	运动副类型
全局坐标系	螺母	转动副
全局坐标系	丝杠	移动副
丝杠	垫片	固定副
丝杠	锁紧螺母	固定副
丝杠	轴套	固定副

2.2 接触设置

接触参数是决定IPRSM动力学模型准确性的重要因素。在RecurDyn软件中,两物体间的接触力由法向力与摩擦力两部分组成。其中,基于改进赫兹接触理论[22],通过两刚体间的微小接触穿透等效接触变形,可计算出接触法向力,即

$$f_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\delta}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (6)$$

式中, f_n 为接触法向力; k 、 c 分别为接触及阻尼系数; m_1 、 m_2 、 m_3 分别为刚度指数、阻尼指数及压痕指数; δ 、 $\dot{\delta}$ 分别为穿透量及穿透量随时间变化的速率。

摩擦力[23]可通过法向力和摩擦因数计算得到,计算式为

$$f_t = \mu(v) |f_n| \quad (7)$$

式中, f_t 为摩擦力; $\mu(v)$ 为摩擦因数,受相对速度 v 、静摩擦因数 μ_s 、动摩擦因数 μ_d 影响,计算式为

$$\mu(v) = \begin{cases} \text{hav sin}(|v|, -v, -\mu_s, v_s, \mu_d), & |v| < v_s \\ \text{hav sin}(|v|, v, \mu_s, v_d, \mu_d), & v_s \leq |v| \end{cases} \quad (8)$$

式中, v_s 、 v_d 分别为静摩擦、动摩擦相对运动速度阈值。当 $v \leq v_s$ 时, $\mu(v)$ 随 v 的增加而增加; 当 $v_s < v < v_d$, $\mu(v)$ 逐渐下降; 当 $v \geq v_d$ 时, $\mu(v)$ 保持稳定状态。具体如图 2 所示。

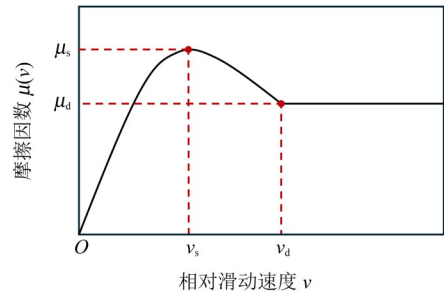


图 2 $\mu(v)$ 和 v 的关系

Fig. 2 Relation between $\mu(v)$ and v

根据图 1 中各零件间的接触关系, 分别在螺母螺纹-滚柱螺纹、丝杠螺纹-滚柱螺纹、丝杠齿轮-滚柱齿轮、滚柱轴颈-保持架内孔、保持架端面-垫片端面之间设置摩擦接触, 并参考文献[24-25], 设置式(6)~式(8)中的接触参数, 如表 3 所示。

表 3 接触参数的设置

Tab. 3 Setting of contact parameters

法向力参数	数值	摩擦力参数	数值
$k/(\text{N}/\text{mm})$	100 000	μ_s	0. 15
$c/[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$	10	μ_d	0. 1
m_1	2	$v_s/(\text{mm}/\text{s})$	1
m_2	1	$v_d/(\text{mm}/\text{s})$	1. 5
m_3	2		

2.3 转速及负载施加

对于 IPRSM 而言, 需在螺母转动副中设置转速, 在丝杠移动副中设置轴向负载。考虑到突变载荷的施加会使数值求解过程不稳定, 甚至使分析结果偏离真实情况, 将仿真过程设置为两个阶段: 螺母转角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 时, 转速与负载以变加速形式逐渐增加; 螺母转角在 $360^\circ \sim 1\,080^\circ$ 时, 转速与负载保持恒定。图 3 所示为螺母转角与转速、负载的对应关系, 具体施加过程是通过 RecurDyn 软件中的 STEP 函数实现的。

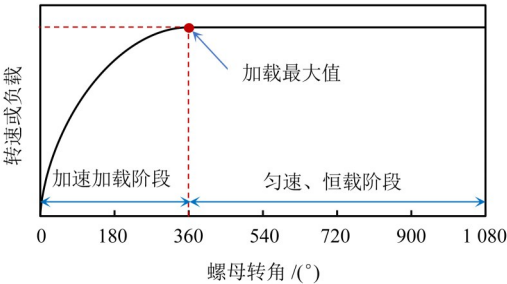


图 3 施加的转速和负载曲线

Fig. 3 Applied speed and load curve

2.4 有效性验证

根据第 2. 1~2. 3 节中所述边界条件设置流程, 在

RecurDyn 软件中完成 IPRSM 的动力学建模, 如图 4 所示。其中, 蓝色标识的运动副分别为相对于全局坐标系所建立的螺母转动副、丝杠移动副, 分别将其边界条件设置为 1 200 r/min、20 000 N, 以进行模型有效性的验证分析。

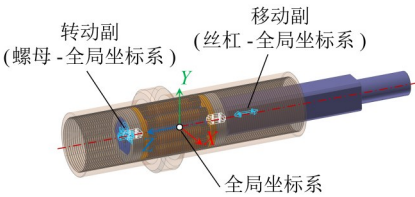


图 4 RecurDyn 软件中建立的 IPRSM 动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of the IPRSM established in the RecurDyn software

图 5~图 7 所示分别为仿真计算得到的 ω_p 、 ω_R 、 v_{sz} 及其与式(1)~式(5)的理论计算结果的对比。从图 5~图 7 可以看出, 仿真与理论计算结果具有良好的一致性。特别的, 滚柱与丝杠的端面齿轮呈周期啮合关系, 从而导致滚柱自转速度计算值在稳定状态下呈现周期性波动。

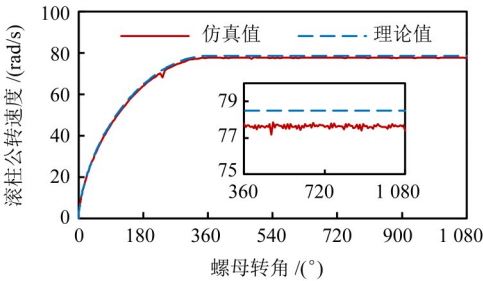


图 5 ω_p 的理论及仿真结果

Fig. 5 Theoretical and simulation results of ω_p

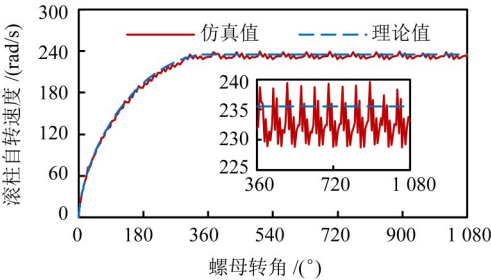


图 6 ω_R 的理论及仿真结果

Fig. 6 Theoretical and simulation results of ω_R

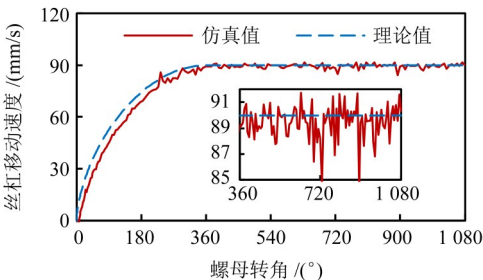


图 7 v_{sz} 的理论及仿真结果

Fig. 7 Theoretical and simulation results of v_{sz}

表 4 所示为图 5~图 7 中螺母转角在 $360^\circ \sim 1\,080^\circ$

的仿真与理论计算结果的数据平均值及平均相对误差。从表4可以看出，各项参数的平均相对误差均小于2%。产生误差的主要原因是理论计算中忽略了零

件间接触变形与冲击振动对传动的影响。综上可以说明，本文所建立的IPRSM动力学模型具有较好的有效性。

表4 理论与仿真结果对比
Tab. 4 Comparison of theoretical and simulation results

ω_p			ω_R			v_{sz}		
仿真值/(rad/s)	理论值/(rad/s)	相对误差/%	仿真值/(rad/s)	理论值/(rad/s)	相对误差/%	仿真值/(mm/s)	理论值/(mm/s)	相对误差/%
77.63	78.50	1.1	232.79	235.50	1.2	89.47	89.95	0.5

3 不同工况下的传动特性分析

基于所建立的动力学模型，定量分析了不同转速、不同负载对IPRSM中单个滚柱与丝杠、螺母之间的平均接触力及传动误差这两个关键传动特性参数的影响规律。

表5所示为分析所涉及的螺母转速与丝杠负载参数。其中，1~4组用于对比分析不同螺母转速的影响；4~7组用于对比分析不同丝杠负载的影响。

表5 仿真的转速及负载参数

Tab. 5 Simulation parameters of the speed and the load

组号	螺母转速/(r/min)	丝杠负载/N
1	300	20 000
2	600	20 000
3	900	20 000
4	1 200	20 000
5	1 200	5 000
6	1 200	10 000
7	1 200	15 000

需要注意的是，以下分析结果均基于螺母转角在360°~1 080°的动力学仿真结果计算。其中，零件间的平均接触力可根据瞬时接触力计算平均值得到，计算式为

$$\bar{F} = (\sum_{i=1}^n F_i)/n \tag{9}$$

式中， $\bar{F}$ 为求解的平均接触力； n 为匀速、恒定载荷阶段所采集的瞬时接触力数据点个数； F_i 为第*i*个瞬时接触力数据点。

传动误差根据转角范围内仿真与理论结果之差计算，计算式为

$$\Delta L_s = L'_s - L_s \tag{10}$$

式中， ΔL_s 为瞬时传动误差； L'_s 、 L_s 分别为动力学模型计算得到的丝杠直线位移以及理论直线位移。在计算的螺母转角范围内，瞬时传动误差的最大值与最小值之差即为该区间内的传动误差。

3.1 不同螺母转速

图8所示为不同转速下滚柱螺纹与丝杠螺纹、螺母螺纹间的平均接触力。随着转速增加，接触面之间所受的冲击振动也增加，从而导致接触力略微增长。此外，外载荷作用导致滚柱偏离理论位置，从而造成螺母与滚柱间的接触力略高于丝杠与滚柱间的接触力。

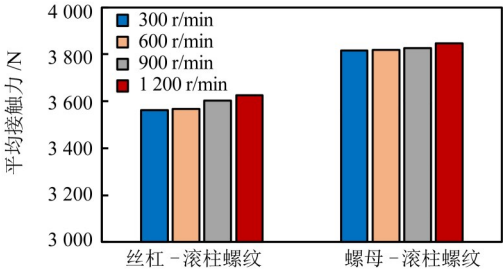


图8 不同转速下的螺纹面接触力

Fig. 8 Contact force of the threaded surface at different speeds

图9所示为不同转速下滚柱与丝杠左、右齿轮的齿面平均接触力。在IPRSM的理论运行过程中，端面齿轮仅用于限制滚柱、丝杠、螺母的啮合同步性，不承担外载荷。由于动力学模型考虑了滚柱轴颈与保持架内孔的真实接触变形状态，导致滚柱存在节圆偏移、轴线偏转，从而造成啮合齿面间存在额外载荷，且左、右齿面的载荷分配不均。此外，同样由于冲击振动影响，齿面接触力随转速的增加而增加。

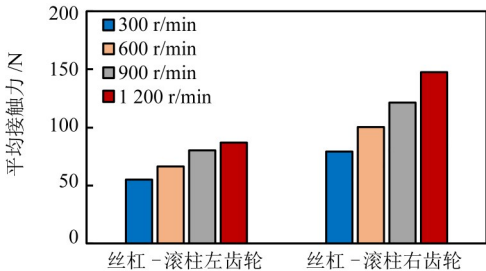


图9 不同转速下的齿面接触力

Fig. 9 Contact force of the tooth surface at different speeds

图10所示为不同转速下滚柱的左、右轴颈与保持架内孔的接触力。随着转速增加，滚柱左侧轴颈处的接触力增加，右侧轴颈处的接触力下降。这一现象同样是由于滚柱的节圆与轴线偏离理论位置，导致

左、右轴颈受力不均。从图 10 还可看出, 在低转速时, 左、右轴颈接触力的差异更为显著。由此推测, 低转速条件下滚柱相对于理论位置的偏离更为显著。

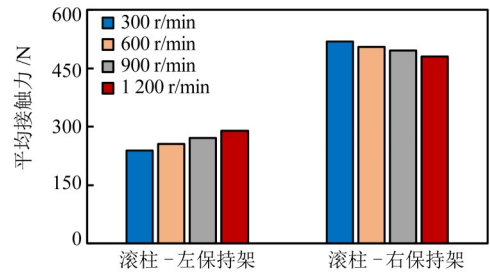


图 10 不同转速下的滚柱轴颈与保持架内孔的接触力
Fig. 10 Contact force between the roller journal and the cage hole at different speeds

图 11 所示为不同转速下的丝杠瞬时传动误差曲线。由于建模过程中未考虑加工及装配误差影响, 因此, 图 11 中的传动误差主要受啮合时接触变形、冲击振动等因素的影响。从图 11 可以看出, 在丝杠的运行过程中, 不同转速下的瞬时传动误差均在 $-3\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 波动。表 6 所示为不同转速下的丝杠瞬时传动误差幅值。随着螺母转速的提高, 运行范围内的传动误差增大。

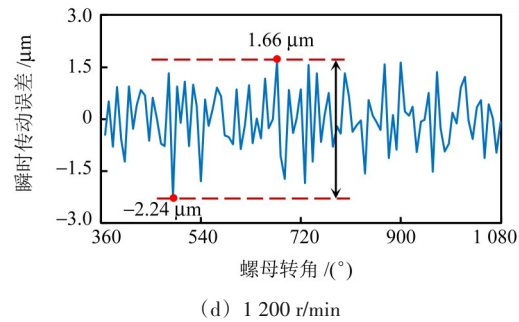
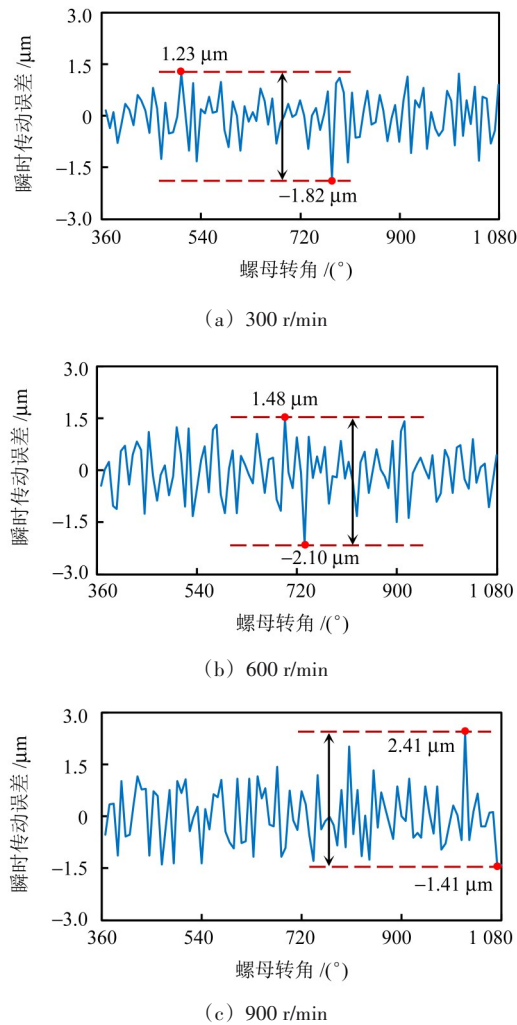


图 11 不同转速下的丝杠瞬时传动误差
Fig. 11 Instantaneous transmission errors of the screw at different speeds

表 6 不同转速下的丝杠瞬时传动误差幅值
Tab. 6 Amplitudes of the screw instantaneous transmission error at different speeds

螺母转速/(r/min)	瞬时传动误差/ μm		传动误差/ μm
	最小值	最大值	
300	-1.82	1.23	3.05
600	-2.10	1.48	3.58
900	-1.41	2.41	3.82
1 200	-2.24	1.66	3.90

3.2 不同丝杠负载

图 12 所示为不同负载下滚柱螺纹与丝杠螺纹、螺母螺纹间接触力平均值。显然, 随着负载的增加, 螺纹面之间承担的载荷会增大, 从而使其平均接触力成线性增加。

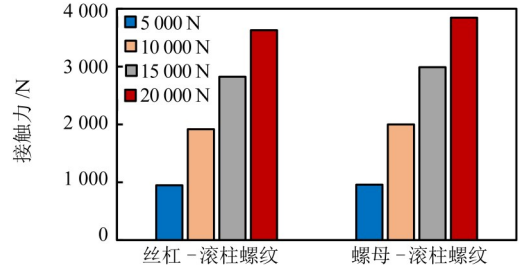


图 12 不同负载下的螺纹面接触力
Fig. 12 Contact force of the threaded surface at different loads

图 13 所示为不同负载下滚柱与丝杠左、右齿轮的齿面接触力。随着负载的增加, 接触力先增加, 后趋于平缓。尤其是在 $10\,000\sim 20\,000\text{ N}$ 的高负载条件下, 齿面的平均接触力无明显波动。由此推测, 负载对滚柱节圆与轴线偏离理论位置的影响相对较小, 受转速影响更为显著。

图 14 所示为不同负载下滚柱的左、右轴颈与保持架内孔的接触力。如第 3.1 节所述, 接触变形的影响导致滚柱偏离理论运行位置, 从而造成滚柱左、右轴颈受力不均。因此, 左、右轴颈处的平均接触力存在一定的差异, 并且随着负载的增加, 接触力的差异更为显著。

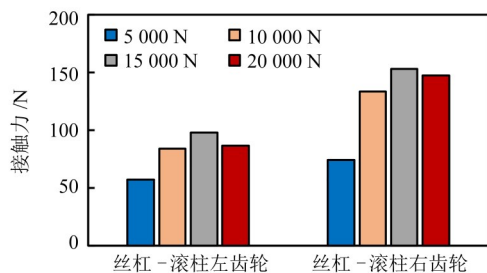


图 13 不同负载下的齿面接触力

Fig. 13 Contact force of the tooth surface at different loads

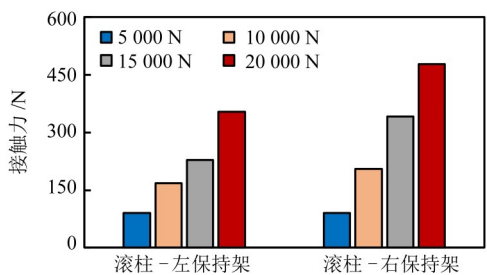
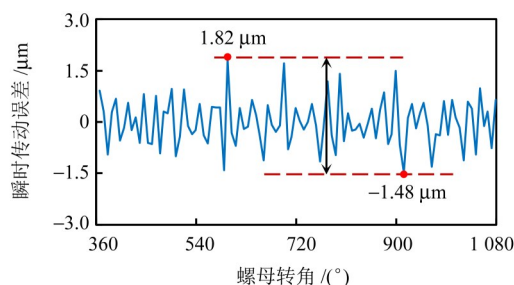


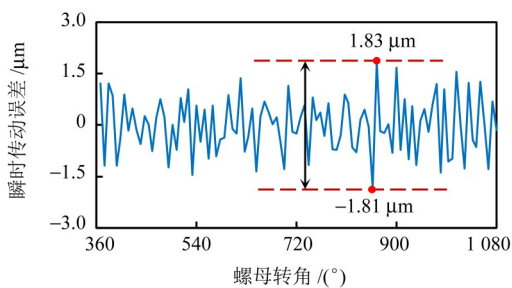
图 14 不同负载下的滚柱轴颈与保持架内孔的接触力

Fig. 14 Contact force between the roller journal and the cage hole at different loads

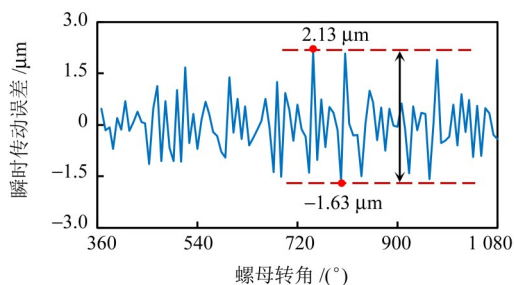
图 15 所示为不同负载下的丝杠瞬时传动误差曲线。表 7 所示为对应的丝杠瞬时传动误差幅值。从中可知,随着负载的增加,接触面间的弹性变形增大,从而导致传动误差的幅值增大。



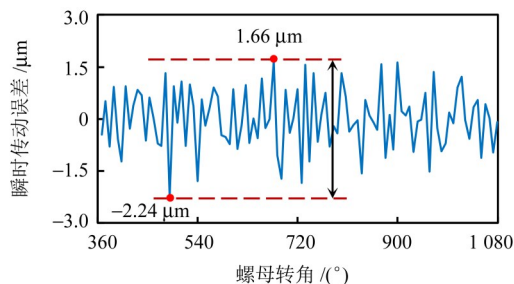
(a) 5 000 N



(b) 10 000 N



(c) 15 000 N



(d) 20 000 N

图 15 不同负载下的丝杠瞬时传动误差

Fig. 15 Instantaneous transmission errors of the screw at different loads

表 7 不同负载下的丝杠瞬时传动误差幅值

Tab. 7 Amplitudes of the screw instantaneous transmission error at different loads

丝杠负载/N	瞬时传动误差/μm		传动误差/μm
	最小值	最大值	
5 000	-1.48	1.82	3.30
10 000	-1.81	1.83	3.64
15 000	-1.63	2.13	3.76
20 000	-2.24	1.66	3.90

4 结论

针对行星滚柱丝杠副多零件、多点接触、多运动副导致的精确动力学建模困难的问题,提出一种基于 RecurDyn 软件的动力学建模方法,并以某型反向式行星滚柱丝杠副为例,开展了动力学建模与传动特性研究。得出以下结论:

1) 考虑螺母、滚柱、丝杠及保持架之间的真实接触行为与运动关系,建立了反向式行星滚柱丝杠副动力学模型,将滚柱自转速度、滚柱公转速度、丝杠移动速度的仿真值与理论值进行对比,其相对误差均小于 2%,由此验证了模型的有效性。

2) 在 300~1 200 r/min 的螺母转速范围内,随螺母转速提高,滚柱与丝杠、螺母之间的螺纹平均接触力略微增加,分别由 3 560 N 增加至 3 625 N、3 815 N 增加至 3 846 N;在 5 000~20 000 N 的丝杠负载范围内,随丝杠负载增加,滚柱与丝杠、螺母之间的螺纹平均接触力大幅增加,分别由 946 N 增加至 3 625 N、955 N 增加至 3 846 N。

3) 在反向式行星滚柱丝杠副的运行过程中,受各零件之间接触变形的影响,滚柱存在节圆偏移、轴线偏转现象,从而造成滚柱与丝杠的啮合轮齿间存在额外载荷且载荷分配不均,滚柱左、右轴颈与保持架内孔之间载荷分配不均。

参 考 文 献

- [1] LEPAGNEUL J, TADRIST L, SPRAUEL J M, et al. Fatigue lifespan of a planetary roller-screw mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 172: 104769.
- [2] 刘更, 马尚君, 佟瑞庭, 等. 行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术 [J]. 机械传动, 2012, 36(5): 103-108.
LIU Geng, MA Shangjun, TONG Ruiting, et al. New development and key technology of planetary roller screw [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(5): 103-108.
- [3] 郑伟, 祖莉, 王凯. 精密行星滚柱丝杠副行程误差影响因素试验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 214-224.
ZHENG Wei, ZU Li, WANG Kai. Experiment research on influence factors of travel error of planetary roller screw pair [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 214-224.
- [4] 殷国富, 宋俨轩, 殷鸣, 等. 反向式行星滚柱丝杠承载分布及寿命分析 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 222-228.
YIN Guofu, SONG Yanxuan, YIN Ming, et al. Load distribution and life prediction of inverted planetary roller screw [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 222-228.
- [5] QIAO G, LIU G, MA S J, et al. An improved thermal estimation model of the inverted planetary roller screw mechanism [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(23): 4430-4446.
- [6] LI X, LIU G, FU X J, et al. Review on motion and load-bearing characteristics of the planetary roller screw mechanism [J]. Machines, 2022, 10(5): 317.
- [7] WU L P, MA S J, DENG P, et al. Research on the modeling of bending-torsional coupling and vibration characteristics of planetary roller screw mechanism [J]. Electronics, 2022, 11(9): 1395.
- [8] 马腾龙, 马尚君, 吴林萍, 等. 行星滚柱丝杠螺旋副-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.
- [9] CHENG Z W, ZU L, ZHOU C G. Review on errors and transmission characteristics of the planetary roller screw mechanism [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(12): 5994-6006.
- [10] 吴林萍, 马尚君, 张建新, 等. 基于参数匹配的二级行星滚柱丝杠动力学分析 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(9): 126-134.
WU Linping, MA Shangjun, ZHANG Jianxin, et al. Dynamic analysis of two-stage planetary roller screw mechanism based on parameter matching [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(9): 126-134.
- [11] LISOWSKI F. The specific dynamic capacity of a planetary roller screw with random deviations of a thread pitch [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 55(3): 991-1001.
- [12] FU X J, LIU G, TONG R T, et al. A nonlinear six degrees of freedom dynamic model of planetary roller screw mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 119: 22-36.
- [13] 党金良, 刘更, 马尚君, 等. 反向式行星滚柱丝杠机构运动原理及仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1646-1651.
DANG Jinliang, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Motion principle and simulation analysis of inverted planetary roller screw mechanism [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1646-1651.
- [14] 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 Shangjun, LIU Geng, TONG Ruiting, et al. Kinematic analysis of an inverted planetary roller screw considering roller pitch circle mismatch [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(11): 1421-1426.
- [15] FU X J, LIU G, MA S J, et al. An efficient method for the dynamic analysis of planetary roller screw mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 150: 103851.
- [16] XING M C, ZHANG B H, DENG P, et al. A comprehensive analysis of contact kinematics for planetary roller screw mechanism [J]. Tribology International, 2023, 179: 108127.
- [17] 李欣, 刘更, 宋春雨, 等. 多级行星滚柱丝杠刚体动力学建模与分析 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(5): 1001-1009.
LI Xin, LIU Geng, SONG Chunyu, et al. Rigid-body dynamic analysis of multi-stage planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(5): 1001-1009.
- [18] 郭嘉楠, 何鹏, 黄洪雁, 等. 行星滚柱丝杠动力学特性分析及试验研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(8): 1841-1848.
GUO Jianan, HE Peng, HUANG Hongyan, et al. Theoretical investigation and experimental study on planetary roller screw dynamics [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(8): 1841-1848.
- [19] 解志杰, 张传伟, 薛其河, 等. 行星滚柱丝杠动态摩擦力矩和传动效率分析 [J]. 摩擦学学报, 2019, 39(4): 489-496.
XIE Zhijie, ZHANG Chuanwei, XUE Qihe, et al. Analysis of dynamic friction torque and transmission efficiency of planetary roller screw [J]. Tribology, 2019, 39(4): 489-496.
- [20] 刘更, 马尚君, 付晓军. 行星滚柱丝杠传动: 啮合原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 19-27.
LIU Geng, MA Shangjun, FU Xiaojun. Planetary roller screw drive: meshing principle [M]. Beijing: Science Press, 2019: 19-27.
- [21] 焦晓娟, 张潜渭, 彭斌彬. RecurDyn 多系统优化仿真技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 176-189.
JIAO Xiaojuan, ZHANG Jiewei, PENG Binbin. RecurDyn optimization and simulation technology of multi-body system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 176-189.
- [22] CHOI J, RYU H S, KIM C W, et al. An efficient and robust contact algorithm for a compliant contact force model between bodies of complex geometry [J]. Multibody System Dynamics, 2010, 23(1): 99-120.
- [23] BING S, YE J. Dynamic analysis of the reheat-stop-valve mechanism with revolute clearance joint in consideration of thermal effect [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(12): 1625-1638.
- [24] WANG S S, FENG H L, DU Z F, et al. Study and failure analysis of zero-backlash high precision roller enveloping reducer [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106090.
- [25] WANG S S, DENG X Q, FENG H L, et al. Dynamic simulation analysis and experimental study of an industrial robot with novel joint reducers [J]. Multibody System Dynamics, 2023, 57(2): 107-131.

(下转第56页)