

行星滚柱丝杠螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触载荷特性

马腾龙¹, 马尚君^{1,2}, 吴林萍¹, 付晓军¹, 许千斤¹, 刘更^{1,2}

(1. 西北工业大学陕西省机电传动与控制工程实验室, 710072, 西安;

2. 西安鼎佰精密机电有限公司, 710199, 西安)

摘要: 为揭示行星滚柱丝杠螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触载荷特性,采用有限元方法建立了行星滚柱丝杠数值模型。根据行星滚柱丝杠运动原理,推导了螺母轴向速度和位移理论计算公式,并给出了螺纹牙静载荷分布模型,分别从运动学和静动载荷的角度将数值结果与理论值进行了对比,相对误差均小于 5%,从而验证了模型的正确性。基于数值模型,分析了不同螺母负载、丝杠转速、摩擦系数对行星滚柱丝杠各接触副动态接触载荷的影响规律。研究结果表明:丝杠转速增大,各接触载荷曲线波动增大,同时齿轮副和滚柱轴端与保持架接触载荷曲线波动周期性减小;螺纹副稳态接触载荷受螺纹副-齿轮副同步啮合及齿轮副啮合激励的共同影响呈现微幅波动;螺母负载增大,除齿轮副外各接触副接触载荷成正比增加,其中螺纹副和保持架分担了齿轮副部分载荷,导致齿轮副接触载荷减小;摩擦系数增大,接触载荷增幅明显,且各接触载荷曲线波动变大。

关键词: 行星滚柱丝杠;同步啮合;动态接触;有限元方法;接触载荷

中图分类号: TH132 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202210002 **文章编号:** 0253-987X(2022)10-0011-11

Dynamic Contact Load Characteristics of Synchromesh Between Screw Pair and Gear Pair in the Planetary Roller Screw

MA Tenglong¹, MA Shangjun^{1,2}, WU Linping¹, FU Xiaojun¹, XU Qianjin¹, LIU Geng^{1,2}

(1. Shaanxi Engineering Laboratory for Transmissions and Controls, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xi'an Ding Bai Precision Technology Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: A numerical model of planetary roller screw is established by using the finite element method to reveal the dynamic contact load characteristics of synchromesh between the thread pair and gear pair in the planetary roller screw. According to the motion principle of planetary roller screw, the theoretical calculation formulas of the axial speed and displacement of nuts are derived, and the static load distribution model of thread tooth is provided. The numerical results are compared with the theoretical values in terms of kinematics and static loads, and the relative errors are both less than 5%, which verifies the correctness of the model. Based on the numerical model, the influence of different nut loads, screw speeds and friction coefficients on the dynamic contact load of each contact pair of planetary roller screw is analyzed. The results show that the fluctuation of contact load curves increases with the increase of screw speed, and the fluctuation of contact load curves between gear pair and roller shaft end and cage decreases periodically. The

收稿日期: 2022-03-25。 作者简介: 马腾龙(1995—),男,硕士生;马尚君(通信作者),男,副研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875458,51905428);陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLGY10-08)。

网络出版时间: 2022-06-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220617.1734.002.html>

steady state contact load of the screw pair fluctuates slightly under the influence of the synchro-mesh of thread pair and gear pair and the meshing excitation of the gear pair. As the nut load increases, the contact load of all contact pairs (but the gear pair) increases in direct proportion. The thread pair and the cage share partial load of the gear pair, leading to the reduction of the contact load of the gear pair. As the friction coefficient increases, the contact load increases obviously, and the fluctuation of each contact load curve becomes larger.

Keywords: planetary roller screw; synchro-mesh; dynamic contact; finite element method; contact load

行星滚柱丝杠(planetary roller screw mechanism, PRSM)是一种可将旋转运动和直线运动相互转化的精密机械传动机构^[1],具有螺纹副和齿轮副同步啮合特征。PRSM以其承载能力强、精度高、抗冲击等特点,逐步成为航空、航天、航海等军事领域装备和石油化工、食品包装、过程控制等民用领域机械装备直线伺服系统的主要执行机构之一。

行星滚柱丝杠具有螺纹副-齿轮副同步啮合的复杂结构,国内外对于PRSM螺纹副的动态接触特性已经有一定研究基础:Velinsky等^[2]研究了PRSM中滚柱和螺母之间的轴向滑移,建立了滚柱在丝杠和螺母接触点处的轴向滑移速度的运动学模型;Abevi等^[3]以反向式PRSM为对象,采用3D有限元方法研究了螺纹在重载条件下的静态接触行为及接触压力分布,获得了拉压条件下系统的轴向刚度和载荷分布;马尚君等^[4-5]分析了反向式PRSM中滚柱位移对机构导程和滑动速度的影响,并得到了与Jones等^[6-7]相同的结论,即滚柱节圆的偏移不会影响机构导程,并且建立了考虑不同螺纹旋向的分析模型,基于行星传动的原理揭示了各构件参数间的关系;付晓军等^[8]建立了非线性六自由度刚体动力学模型,研究了重载和轻载等工况下PRSM的瞬态和稳态动力学行为;张文杰等^[9]总结了PRSM安装方式并进行了受力分析,综合PRSM接触刚度、螺纹牙刚度和轴段刚度,建立了计算PRSM螺纹牙载荷分布的数学模型;佟瑞庭等^[10]建立了单对滚柱与丝杠啮合副的接触模型,分析了螺纹牙型角对行星滚柱丝杠接触特性的影响;郭辉等^[11]基于螺纹牙载荷分布和螺纹牙受载变形关系,提出了滚柱螺纹牙的修形方法,得到了修形量最优值;姚琴等^[12]以赫兹接触理论及弹塑性力学为基础,建立了丝杠与滚柱单对接触模型,分析了载荷与行星滚柱丝杠副弹塑性接触变形的关系;杨家军等^[13]基于赫兹弹性接触理论,分析了行星滚柱丝杠的载荷分布规律,并建立了新的静刚度数学模型;郭嘉楠等^[14]依据赫兹接触理论建立了考虑螺纹啮合刚度的行星

滚柱丝杠动力学模型,分析了螺纹接触角和滚柱半径对啮合刚度和固有频率的影响规律;付永领等^[15]基于载荷分布规律,研究了负载对摩擦力矩的影响规律;郑正鼎等^[16]基于空间啮合理论与赫兹接触理论,分析了差动式行星滚柱丝杠承载特性;刘柱等^[17]提出了考虑滚柱弯曲变形时的标准型行星滚柱丝杠副的载荷分布计算方法,分析与研究了螺纹误差和装配误差对行星滚柱丝杠副载荷分布规律的影响。PRSM齿轮副具有内啮合和行星传动特征,其啮合接触特性对承载及螺纹副-齿轮副同步啮合特性有重要影响。周建星等^[18]采用集中质量方法建立了行星齿轮传动系统碰撞振动分析模型,分析了负载和转速对啮合接触力的影响;陶庆等^[19]采用有限元方法建立了行星齿圈结构模型,依据啮合力与内齿圈的变形协调关系建立了传动系统刚-柔耦合动力学模型;王成龙等^[20]采用有限元方法建立齿圈结构动力学分析模型,将内齿圈各轮齿啮合区进行划分,用轮齿承载接触分析(LTCA)方法确定齿间载荷分配关系,计算了不同载荷下内齿圈齿根动应力;冯诗愚等^[21]采用线弹性理论,建立了内啮合齿面接触力计算的数学模型,分析了间隙对内啮合接触力的影响规律。

现有研究为PRSM的静动态运动特性分析奠定了重要基础,但分析模型多局限于螺纹部分静态和动态接触分析,未充分反映螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触、参数间耦合作用及其对系统动力学响应研究的规律;而且动力学研究主要以刚体为主,引起接触状态变化的潜在因素尚不清楚。因此,需要建立考虑螺纹副和齿轮副同步啮合的新模型,来进一步研究动态接触载荷特性。

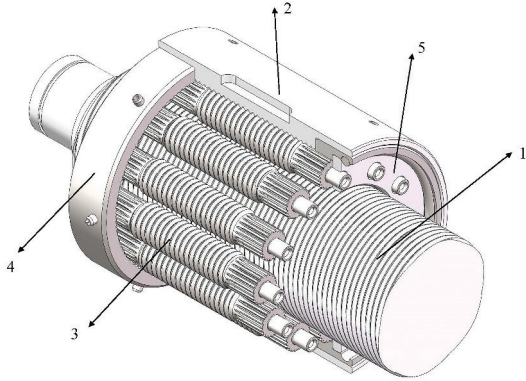
本文基于PRSM运动学原理,采用有限元方法建立了数值模型,进行运动学及动力学仿真分析。在验证数值模型正确性的基础上,研究了滚柱-丝杠侧与滚柱-螺母侧动态接触载荷、齿轮副动态接触载荷、滚柱轴端与保持架接触载荷的变化规律以及不同螺母负载、丝杠转速、摩擦系数对PRSM动态接

触特性的影响规律,为揭示螺纹副-齿轮副同步啮合耦合动态接触载荷特性奠定理论基础。

1 PRSM 运动原理

1.1 PRSM 结构及工作原理

本文以标准式 PRSM 为研究对象,即丝杠为主动件,丝杠的旋转运动通过滚柱的行星运动转换为螺母的直线运动,其结构如图 1 所示。图 1 中丝杠 1 是牙型角为 90° 的多头螺纹,滚柱 3 是具有相同牙型角的单头螺纹,其牙型轮廓通常加工成球面,目的是提高承载能力。螺母 2 是具有与丝杠相同头数和牙型的内螺纹。若干个滚柱沿丝杠圆周方向均匀分布,当丝杠旋转时,滚柱既绕着丝杠轴线公转,又绕自身轴线自转。滚柱与螺母具有相同的螺旋升角,与螺母啮合时能够确保纯滚动并且没有相对轴向位移。为消除丝杠螺旋升角对滚柱产生的倾斜力矩,在滚柱两端加工有直齿,与内齿圈 4 啮合,以确保滚柱轴线平行于丝杠轴线而正常滚动;5 为滚柱保持架,使滚柱沿圆周均匀分布。



1—丝杠;2—螺母;3—滚柱;4—内齿圈;5—保持架。

图 1 行星滚柱丝杠主要结构

Fig. 1 The main structure of the planetary roller screw

1.2 PRSM 运动分析

标准式 PRSM 运动简图如图 2 所示^[22],A 为滚柱的起始位置,E 点为丝杠转动一周后滚柱的终点位置。 d_N 、 d_R 、 d_S 分别是螺母、滚柱、丝杠的螺纹中径, d_P 为滚柱公转直径, ω_S 为丝杠转动角速度, ω_R 为滚柱绕自身轴线的自转角速度, ω_P 为滚柱公转角速度, φ_{slide} 为纯滑动部分的相对转角。

由于滚柱和螺母螺旋升角相同,通常螺母与负载相连,采用止转结构约束其周向自由度,因此滚柱和螺母无相对轴向位移。接触点 A 为速度瞬心,则可求得滚柱中心 O 点的速度表达式

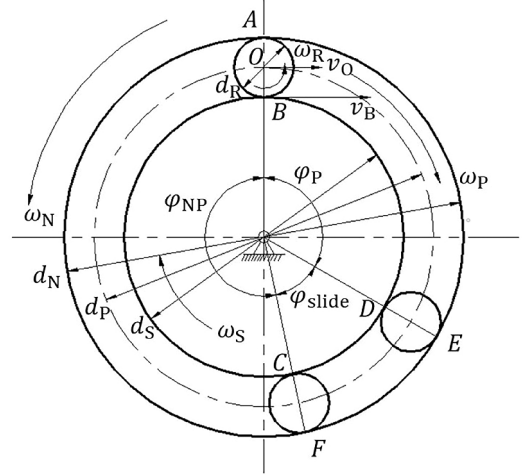


图 2 标准式行星滚柱丝杠运动简图

Fig. 2 Standard planetary roller screw motion diagram

$$\omega_P = \frac{d_S}{2d_P} \omega_S = \frac{d_S}{2(d_S + d_R)} \omega_S = \frac{k}{2(k+1)} \omega_S \quad (1)$$

式中 k 为丝杠与滚柱的螺纹中径之比。

规定丝杠旋转一周后,滚柱公转角度为 φ_P ,绕自身轴线自转角度为 φ_r ,在纯滚动状态下,滚柱自转转过的弧长与在螺母上滚动的弧长相等,即

$$\frac{\varphi_r d_R}{2} = \frac{\varphi_P d_N}{2} \quad (2)$$

由此可得

$$\frac{\varphi_r}{\varphi_P} = \frac{d_N}{d_R} = k + 2 \quad (3)$$

由于 $\varphi_r/\varphi_P = \omega_R/\omega_P$,与式(1)、式(2)联立得

$$\omega_R = \frac{\omega_S k(k+2)}{2(k+1)} \quad (4)$$

由于丝杠和滚柱之间会产生相对滑动,可将丝杠与滚柱之间的相对运动分解为纯滚动部分 $\widehat{BD}$ 和纯滑动 $\widehat{DC}$ 部分。同理,滚柱相对于丝杠的轴向位移 L_{RS} 也可分解为两部分:丝杠不动,滚柱转动时产生的轴向位移 L_{RS}^r ;滚柱不动,丝杠转动时,滚柱的轴向位移 L_{RS}^a 。可得

$$L_{RS} = L_{RS}^r + L_{RS}^a \quad (5)$$

$$L_{RS}^r = \frac{\varphi_r}{2\pi} P \quad (6)$$

$$L_{RS}^a = -L_S^a \quad (7)$$

式中: P 为螺距; L_S^a 与丝杠相对转角 φ_{NP} 、 φ_{slide} 及导程有关, φ_{NP} 为纯滚动部分的相对转角。

取 L_{RS}^a 方向为正方向,根据左右手法则得

$$L_S^a = \mp \frac{\varphi_{NP} + \varphi_{slide}}{2\pi} n_S P \quad (8)$$

式中 n_s 为丝杠螺纹头数。

根据图 2 中零件相对转角位置关系,可得

$$\varphi_{NP} + \varphi_{slide} + \varphi_P = 2\pi \quad (9)$$

由式(5)~(9)得

$$L_{RS} = \frac{\varphi_r}{2\pi}P \mp \frac{\varphi_p}{2\pi}n_sP \mp n_sP \quad (10)$$

当丝杠与滚柱之间发生相对滑动时,根据转角之间的相互关系,丝杠应与滚柱的旋向相反,即

$$\frac{\varphi_r}{2\pi}P - \frac{\varphi_p}{2\pi}n_sP = 0 \quad (11)$$

$$L_{RS} = n_sP \quad (12)$$

L_{RS} 即为丝杠旋转一周后螺母的直线位移。当丝杠转动任意角度时,螺母的直线位移可表示为

$$L_N = \frac{\omega_s t}{2\pi}n_sP \quad (13)$$

对式(13)中时间 t 求导,可得螺母的直线速度

$$v_N = \frac{\omega_s}{2\pi}n_sP \quad (14)$$

1.3 PRSM 受力分析

PRSM 承载后螺纹牙间产生的接触载荷沿其空间螺旋曲面法线方向,可将螺纹牙法向接触载荷分解为 3 个方向的分力,如图 3、图 4 所示。

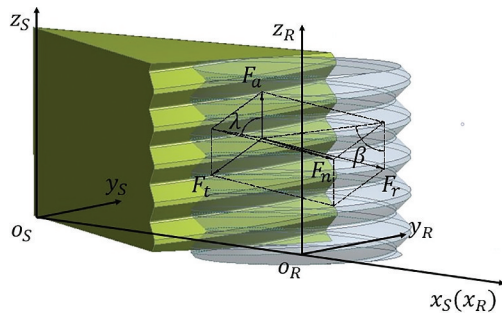


图 3 行星滚柱丝杠滚柱和丝杠侧受力分析

Fig. 3 Force analysis at the planetary roller screw-roller interface

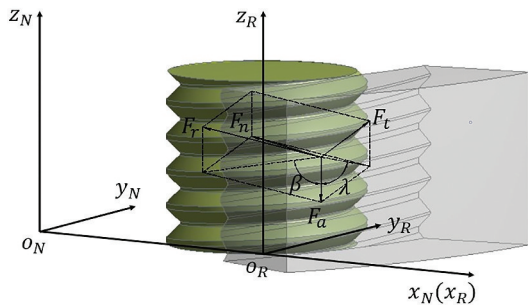


图 4 行星滚柱丝杠滚柱和螺母侧受力分析

Fig. 4 Force analysis at the planetary roller screw roller-nut interface

根据受力分析, F_n 、 F_a 、 F_t 、 F_r 有如下的关系

$$F_t = F_a \tan \lambda \quad (15)$$

$$F_r = F_a \tan \beta \quad (16)$$

$$F_n = F_a \sqrt{1 + \tan^2 \lambda + \tan^2 \beta} \quad (17)$$

式中: F_a 为螺纹牙法向接触载荷轴向分力; F_n 为螺纹牙法向接触载荷; F_t 为螺纹牙法向接触载荷切向分力; F_r 为螺纹牙法向接触载荷径向分力; λ 为螺旋升角; β 为牙侧半角。

现有文献关于 PRSM 的受力分析多集中于螺纹部分受力,同时考虑多个啮合副的受力较为复杂,但还没有有效手段,故本文采用有限元方法建立螺纹副-齿轮副同步啮合数值模型进行动态接触载荷特性分析。

2 数值模型

2.1 PRSM 模型简化

本文研究对象的螺纹副和齿轮副参数如表 1、表 2 所示。

表 1 行星滚柱丝杠螺纹副参数

Table 1 Planetary roller screw thread pair parameters

参数	数值
丝杠螺纹中径 d_s /mm	44
螺纹头数 n	6
螺距 p /mm	2
螺旋升角 λ /($^\circ$)	4.962
牙侧角 β /($^\circ$)	45
滚柱螺纹中径 d_R /mm	11
滚柱螺纹牙数	5
螺母螺纹中径 d_N /mm	66
圆弧齿廓半径 ρ_a /mm	7.778

表 2 行星滚柱丝杠齿轮副参数

Table 2 Planetary roller screw gear pair parameters

参数	滚柱齿	内齿圈
模数 m /mm	0.55	0.55
齿数 z	20	120
压力角 α /($^\circ$)	37.5	37.5
齿顶圆直径 d_a /mm	10	64
齿根圆直径 d_f /mm	8.73	65.27
滚柱齿齿根圆弧半径 R_{br} /mm	0.1	0.1
内齿圈齿根圆弧半径 R_{bg} /mm	0.1	0.1

由图 1 可知 PRSM 为循环对称结构,多个滚柱均布在丝杠周围,负载均匀施加于螺母上。对有限元模型进行合理简化^[3]:①保留丝杠、滚柱、螺母、内

齿圈及保持架等主要零件,省略挡圈、销轴等零件,其作用可通过有限元模型中约束条件代替;②为节省计算时间,保留 3 个滚柱,呈均匀分布,保证受力均布,且每个滚柱保留 5 个螺纹牙;③PRSM 中各零件倒角和圆角在模型中忽略。

简化后的 PRSM 有限元模型如图 5 所示,螺纹副和齿轮副接触区域密化如图 6 所示,单元类型为 Tetrahedrons 四面体网格,共有 955 519 个单元,1 555 868 个节点,选用的材料均为 GCr15,密度 ρ 为 $7\,810\text{ kg/m}^3$,弹性模量 E 为 212 GPa ,泊松比 μ 为 0.29 。

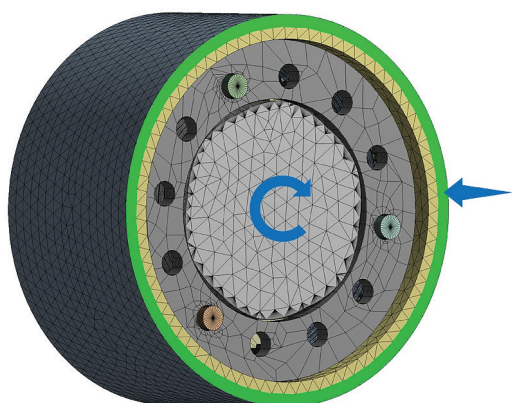


图 5 行星滚柱丝杠有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the PRSM

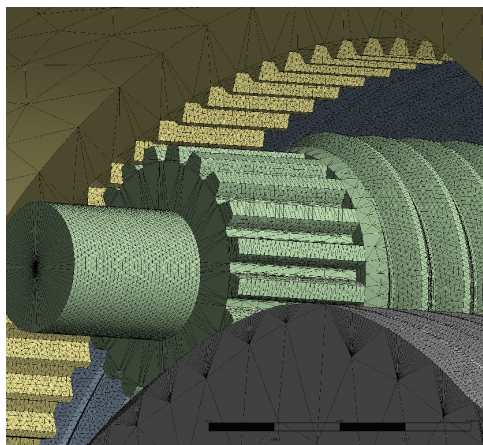


图 6 行星滚柱丝杠螺纹副和齿轮副接触区域网格密化图

Fig. 6 Mesh density diagram of contact area between planetary roller screw thread pair and gear pair

2.2 边界条件

位移边界条件是:丝杠只作旋转运动,给丝杠施加旋转副;螺母只作直线运动,在螺母上添加移动副;内齿圈与螺母固定,对内齿圈添加移动副;滚

柱既做自转运动,又做公转运动,在滚柱与保持架之间施加旋转副(相当于滚柱的自转),给保持架添加圆柱副(相当于滚柱公转并可伴随螺母一起移动)。接触分别为滚柱和丝杠、螺母螺纹副接触、滚柱齿和内齿圈之间的齿轮副接触、滚柱和保持架之间的接触。

力边界条件是丝杠施加转速,螺母施加与运动方向相反的轴向负载。丝杠转速方向和螺母负载施加位置及方向如图 5 所示。

2.3 模型验证

2.3.1 运动学验证

施加 5 kN 螺母轴向负载,计算丝杠旋转角速度分别为 10 、 20 、 30 rad/s 时螺母的轴向位移和轴向速度,由文献[23]可知,上述运动特性曲线在初始极短时间内发生振动后趋于稳定,通过前期试算,设置数值模拟时间为 0.02 s ,即可获得较为稳定的位移和速度曲线,计算结果如图 7、图 8 所示。

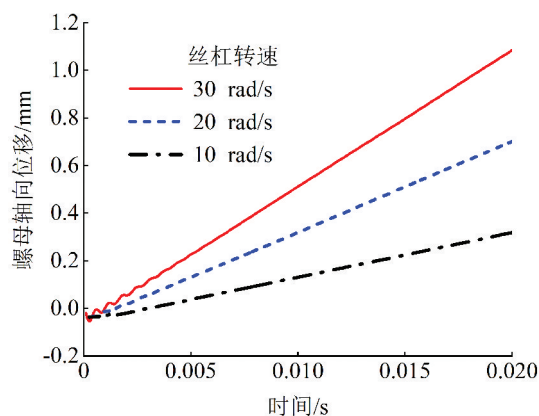


图 7 行星滚柱丝杠螺母轴向位移

Fig. 7 Axial displacement of planetary roller screw nut

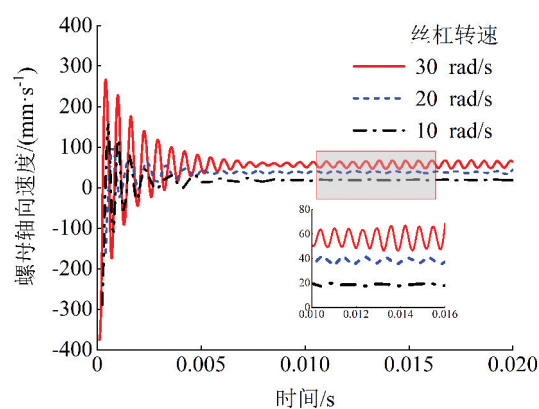


图 8 行星滚柱丝杠螺母轴向速度

Fig. 8 Axial speed of planetary roller screw nut

由图 7、图 8 可知,数值模型求得螺母的轴向位移分别为 0.319、0.701、1.086 mm,轴向速度稳态均值分别为 18.556、38.148、56.828 mm/s。图 8 中螺母轴向速度出现波动,是由于启动时存在装配间隙易发生打滑现象,导致初始波动幅度较大;开始运转后,在轴向载荷作用下,随着接触点增多,速度波动减小,运转趋于平稳。随着转速增加,螺母轴向速度初始阶段曲线的波动幅度也对应增加。

将表 1、表 2 参数代入式(13)、式(14),可得不同丝杠转速下螺母的轴向位移和速度的解析解,对比结果如表 3、表 4 所示。

表 3 行星滚柱丝杠螺母轴向位移解析解与数值解对比

Table 3 Comparison between analytical solution and numerical solution of planetary roller screw nut axial displacement

丝杠转速/ (rad · s ⁻¹)	解析解/mm	数值解/mm	相对误差/%
10	0.382	0.364	4.7
20	0.764	0.731	4.3
30	1.146	1.099	4.1

表 4 行星滚柱丝杠螺母轴向速度解析解与数值解对比

Table 4 Comparison between analytical and numerical solutions of planetary roller screw nut axial speed

丝杠转速/ (rad · s ⁻¹)	解析解/ (mm · s ⁻¹)	数值解/ (mm · s ⁻¹)	相对 误差/%
10	19.099	18.556	2.80
20	38.197	38.148	0.13
30	57.296	56.828	0.82

由表 3、表 4 对比结果可以看出,螺母轴向位移和速度的解析解和数值解吻合较好,相对误差均在 5% 以内,从运动学角度验证了该数值模型的正确性。

2.3.2 载荷验证

现有关于 PRSM 的接触载荷研究主要集中于螺纹副,鲜有考虑螺纹副-齿轮副同步啮合时各啮合副的接触载荷变化规律。为了便于载荷对比,本文数值模型仅提取螺纹副载荷与已有文献进行对比。文献[24]研究表明,PRSM 在轴向载荷作用下,丝杠、滚柱及螺母都将发生弹性变形,并建立了螺纹牙静态载荷分布的弹簧组模型,根据变形协调与受力平衡关系构建线性方程组,载荷分布计算式

$$\frac{\sum_{j=1}^i F_{NRj}}{k_{NB}} + \frac{F_{NRi} - F_{NRi+1}}{k_{NT}} + \frac{F_{NRi}}{k_{RNC}} = \frac{\sum_{j=1}^i F_{SRj}}{k_{RB}} - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} F_{NRj}}{k_{RT}} + \frac{F_{NRi}}{k_{RT}} - \frac{F_{NRi}}{k_{RB}} - \frac{F_{NRi}}{k_{RT}} - \frac{F_{NRi+1}}{k_{RNC}} \quad (18)$$

式中: i, j 为 PRSM 螺纹牙序号; k_{NB} 为 PRSM 螺母螺纹轴段刚度; k_{RB} 为 PRSM 滚柱螺纹轴段刚度; k_{NT} 为 PRSM 螺母螺纹牙刚度; k_{RT} 为 PRSM 滚柱螺纹牙刚度; k_{RNC} 为 PRSM 滚柱螺纹牙轴向接触刚度; F_{NRj} 为滚柱螺母侧第 j 个螺纹牙所受轴向载荷; F_{SRj} 为滚柱丝杠侧第 j 个螺纹牙所受轴向载荷。

基于文献[24]螺纹牙载荷分布模型,结合本文模型参数,对螺母施加负载 5 kN,计算得到螺纹牙轴向静载荷分布如图 9 所示。由图 9 可知,滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧的各螺纹牙轴向载荷均值差异较小,约为 0.333 kN,对各螺纹牙载荷求和可进一步得到整个滚柱与丝杠、螺母之间的轴向载荷为 1.667 kN,根据式(17)及表 1 中的参数数据,可求得滚柱静载下螺纹副法向接触载荷理论值为 2.363 kN。

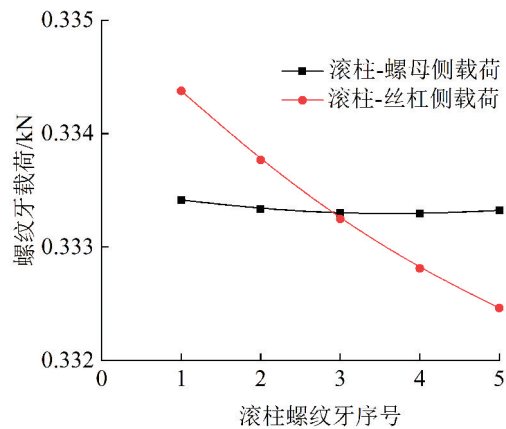


图 9 行星滚柱丝杠螺纹牙载荷分布

Fig. 9 Load distribution of planetary roller screw threaded teeth

以丝杠转速为 30 rad/s、螺母负载为 5 kN、摩擦系数为 0.02 为例进行数值模拟,得到滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧动态接触载荷曲线,并与通过载荷分布模型求得的滚柱静载下螺纹副接触载荷理论值曲线进行对比,如图 10 所示。

由图 10 可知:螺纹副动态接触载荷在静态接触载荷附近波动,当螺纹副承载达到稳态后,动态接触载荷与静态接触载荷趋于一致,但动态接触载荷较静态理论值偏大,其中丝杠侧为 2.381 kN,螺母侧为 2.372 kN,除了受齿轮副啮合激励的影响外,螺

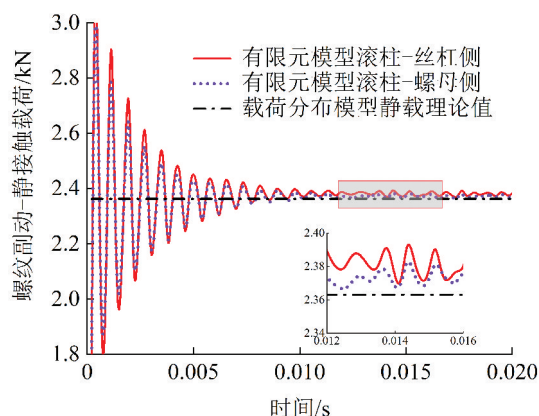


图 10 行星滚柱丝杠螺纹副动-静载荷结果对比

Fig. 10 Comparison of dynamic and static load results of planetary roller screw thread pairs

纹副和齿轮副同步啮合产生变形后的耦合作用也是导致动态接触载荷产生波动且大于静态理论值的主因之一,相对误差较小,分别为 0.76%、0.38%,因此从承载的角度验证了有限元模型的正确性;滚柱与丝杠侧的接触载荷波动程度比滚柱与螺母侧大,主要原因是滚柱与丝杠侧的接触点偏离滚柱螺纹中径,滚柱与丝杠侧为滚滑并存的传动模式^[25],滑动摩擦的存在也是导致接触载荷波动的原因之一。

3 PRSM 动态接触特性分析

3.1 啮合副动态接触载荷分析

按照前述有限元模型工况及参数设置,对参与啮合的零件动态接触载荷进行分析。仿真得到螺纹副滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧动态接触载荷曲线、齿轮副动态接触载荷曲线、滚柱轴端与保持架动态接触载荷曲线,如图 11~13 所示。

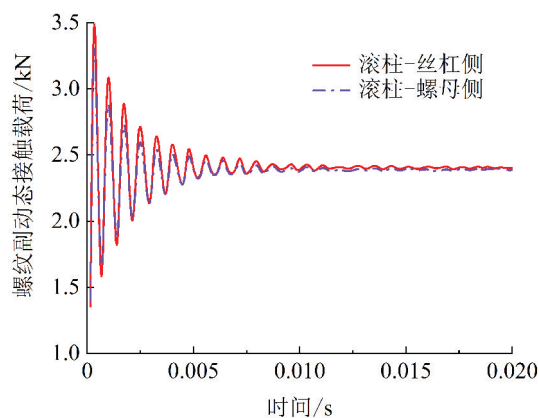


图 11 行星滚柱丝杠螺纹副动态接触载荷

Fig. 11 Dynamic contact load of planetary roller screw thread pair

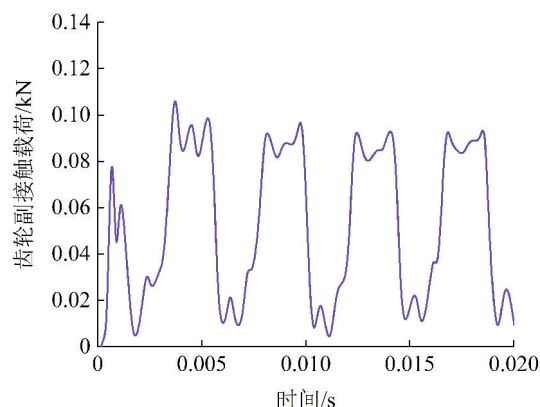


图 12 行星滚柱丝杠齿轮副动态接触载荷

Fig. 12 Dynamic contact load at the planetary roller screw gear pair

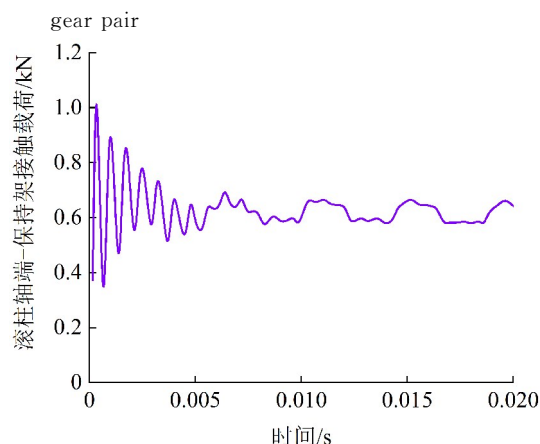


图 13 行星滚柱丝杠滚柱轴端与保持架动态接触载荷

Fig. 13 Dynamic contact load at the planetary roller screw roller-retainer

由图 11 可知,滚柱和丝杠侧稳态接触载荷均值为 2.381 kN,滚柱和螺母侧稳态接触载荷均值为 2.372 kN,滚柱-丝杠侧动态接触载荷大于滚柱-螺母侧动态接触载荷,主要原因是滚柱与螺母接触侧为内螺旋曲面接触,接触面积略大于滚柱与丝杠侧。0.008 s 之前两接触侧接触载荷均出现波动,0.008 s 对应螺母轴向位移为 0.4 mm,表明 0.008 s 之后螺纹副已消除间隙,发生变形使接触面积增大,接触点增多,故接触载荷达到稳定状态。由于螺纹副-齿轮副同步啮合,螺纹副受齿轮副啮合激励的影响,稳态后仍然呈现微幅波动。由图 12 可知,齿轮副接触载荷呈现周期性波动,具有与直齿轮副啮合相似的动态运动特性,稳态后的均值约为 0.059 kN。由图 13 可知,滚柱轴端与保持架稳态后的接触载荷均值约为 0.61 kN,其承受的载荷为齿轮副的 10.3 倍,故该位置的承载特性应在设计 PRSM 时予以考虑。此外,滚柱轴端与保持架动态接触载荷受齿轮副激励的影响较为显著,同样呈现周期性波动。

3.2 转速对啮合副动态接触特性的影响

以螺母负载为 5 kN, 丝杠转速分别为 10、20、30 rad/s 为例, 不同丝杠转速下滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧动态接触载荷、齿轮副动态接触载荷、滚柱轴端与保持架动态接触载荷变化规律如图 14~17 所示。

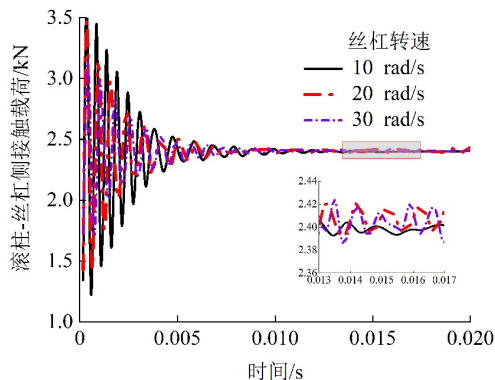


图 14 不同转速下滚柱-丝杠侧动态接触载荷

Fig. 14 Dynamic contact load at the roller-screw interface at different speeds

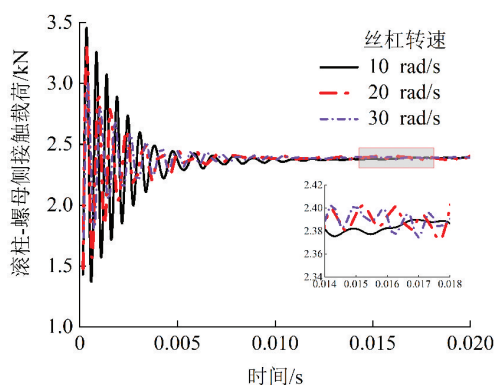


图 15 不同转速下滚柱-螺母侧动态接触载荷

Fig. 15 Dynamic contact load at the roller-nut interface at different speeds

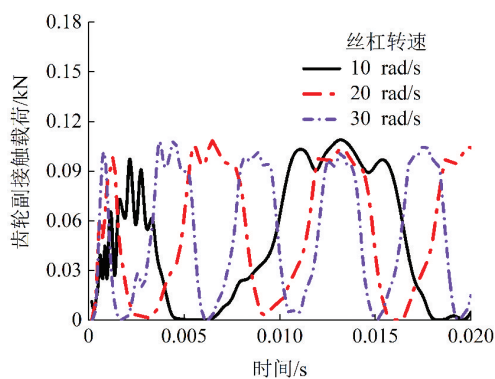


图 16 不同转速下齿轮副动态接触载荷

Fig. 16 Dynamic contact load at the gear pair at different speeds

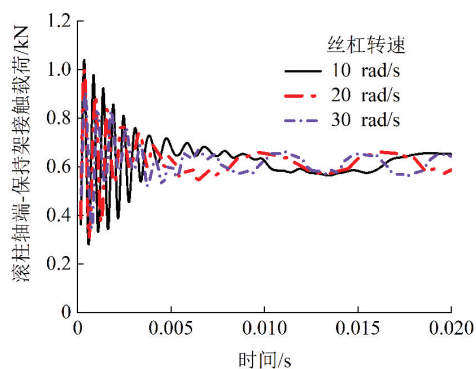


图 17 不同转速下滚柱轴端与保持架动态接触载荷

Fig. 17 Dynamic contact load at the roller-retainer at different speeds

与前述接触载荷曲线变化规律相似, 各个接触副动态接触载荷曲线初始阶段均存在波动。对比图 14、图 15 和图 17 可知, 齿轮副接触载荷波动变化较小, 因为实际工作中, PRSM 承载后, 螺纹副先接触, 较高的转速会使螺纹副产生冲击振动, 对齿轮副的影响较小。由图 14、15 可知, 丝杠转速增加时, 滚柱-丝杠侧与滚柱-螺母侧之间可以尽快消除间隙, 而动态接触载荷达到平稳的时间也就越短, 同时曲线波动也对应增加。

对于具有周期性的齿轮副和滚柱轴端与保持架来说, 根据式(4)可知随着丝杠转速增大, 滚柱转速增大, 由齿轮副啮合频率计算公式: 啮合频率 = 齿轮转频 $\times$ 齿轮齿数, 可知啮合频率增大, 进而啮合周期减小并产生一定相位差, 验证了图 16、17 所示的动态接触特性规律。

3.3 负载对啮合副动态接触特性的影响

以丝杠转速为 30 rad/s, 螺母负载分别为 5、6、7 kN 为例, 不同螺母负载下滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧动态接触载荷、齿轮副动态接触载荷、滚柱轴端与保持架动态接触载荷的影响规律如图 18~21 所示。

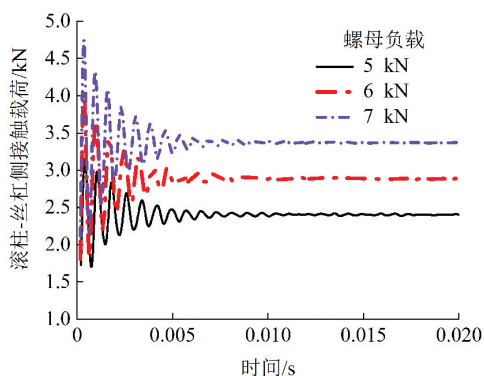


图 18 不同负载下滚柱-丝杠侧动态接触载荷

Fig. 18 Dynamic contact load at the roller-screw interface at different loads

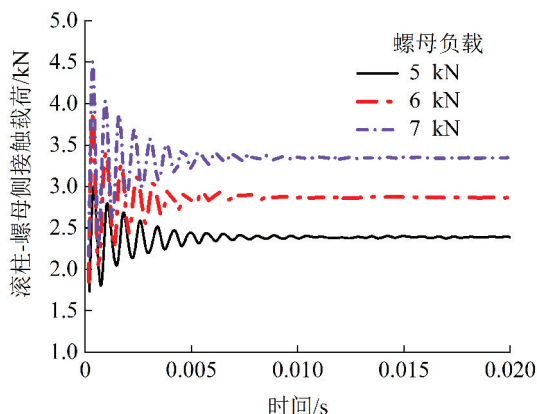


图 19 不同负载下滚柱-螺母侧动态接触载荷

Fig. 19 Dynamic contact load at the roller-nut interface at different loads

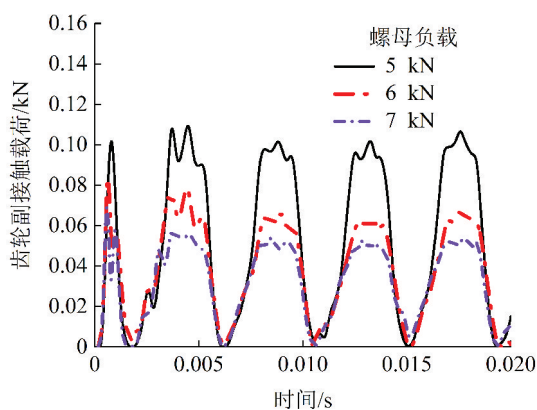


图 20 不同负载下齿轮副动态接触载荷

Fig. 20 Dynamic contact load at the gear pair at different loads

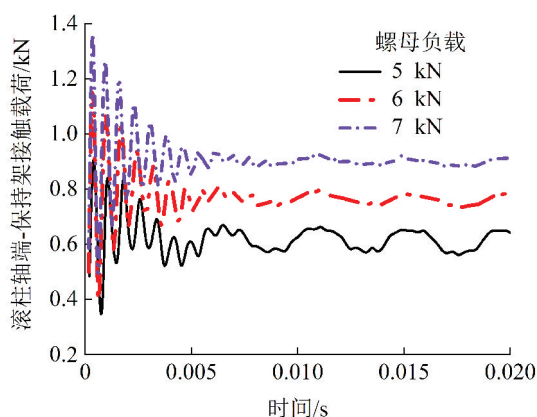


图 21 不同负载下滚柱轴端-保持架侧动态接触载荷

Fig. 21 Dynamic contact load at the roller-retainer at different loads

由图 18、19 和图 21 可知,随着负载增大,各接触副接触载荷成正比增加,同时初始的冲击增大,导致曲线初始波动随之增大。齿轮副与其他接触副不同,如图 20 所示,初始波动依然较小,且接触载荷随着负载增大而减小。由 3.1 节分析结果可知,螺纹副和保持架是主要承载零件,也就是说随着负载增加螺纹副和保持架共同分担了齿轮副部分载荷,使得齿轮副接触载荷变小。因此,各接触副的动态接触载荷应根据使用载荷工况的变化进行详细计算。

3.4 摩擦系数对啮合副动态接触特性的影响

保持载荷和转速条件不变,设置摩擦系数分别为 0.01、0.02、0.03、0.1、0.2,分析不同摩擦系数对动态接触特性的影响规律。滚柱-丝杠侧和滚柱-螺母侧动态接触载荷、齿轮副动态接触载荷、滚柱轴端与保持架动态接触载荷的影响规律如图 22~25 所示。

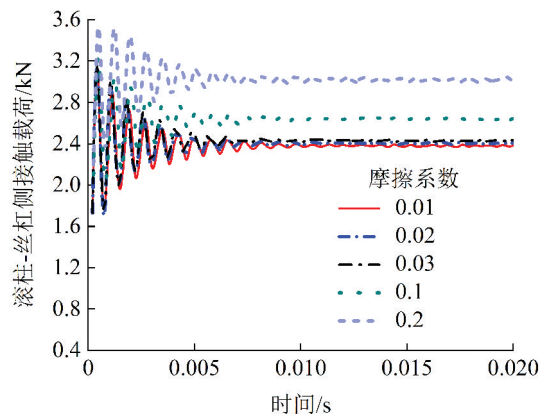


图 22 不同摩擦系数下滚柱-丝杠侧动态接触载荷

Fig. 22 Dynamic contact load at the roller-screw interface at different friction coefficients

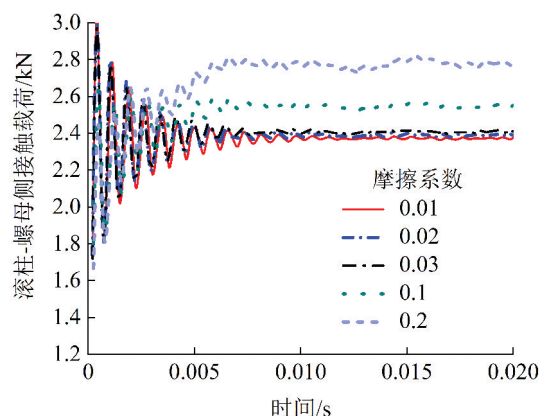


图 23 不同摩擦系数下滚柱-螺母侧动态接触载荷

Fig. 23 Dynamic contact load at the roller-nut interface at different friction coefficients

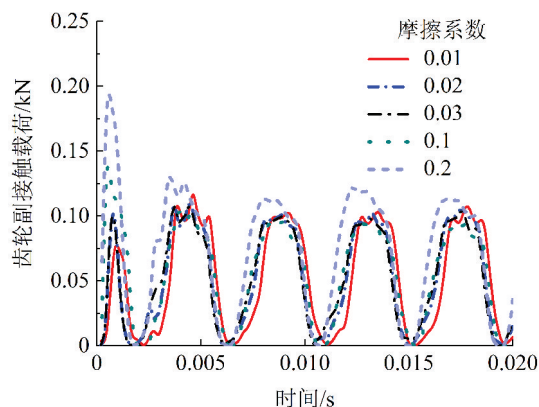


图 24 不同摩擦系数下齿轮副动态接触载荷

Fig. 24 Dynamic contact load at the gear pair at different friction coefficients

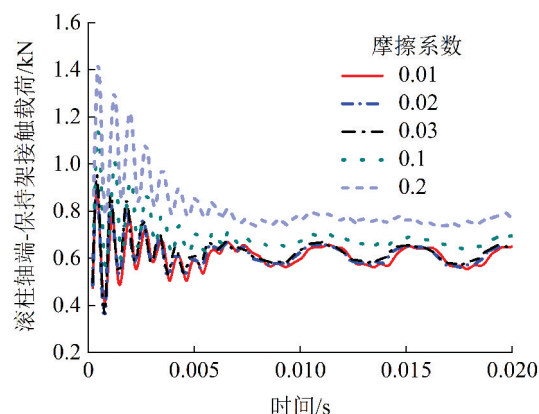


图 25 不同摩擦系数下滚柱轴端-保持架侧动态接触载荷

Fig. 25 Dynamic contact load at the roller-retainer at different friction coefficients

如图 22~25 所示,当摩擦系数为 0.01~0.03 时,各接触副的接触载荷较小且变化不大,当摩擦系数为 0.1、0.2 时增幅较大,稳态阶段各接触副的接触载荷同样增幅明显,尤其是初始阶段接触载荷曲线波动变大。可见,较大的摩擦系数是导致各接触副接触载荷产生剧烈波动的主要原因之一,为提高 PRSM 运转可靠性和稳定性,应尽可能减小摩擦系数。

4 结 论

基于有限元方法建立了 PRSM 数值模型,对螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触特性进行了分析,主要结论如下。

(1) 齿轮副接触载荷呈现周期性波动,具有与直齿轮啮合相似的接触特性;由于螺纹副-齿轮副同步啮合,使得螺纹副接触载荷受齿轮副啮合激励的

影响,稳态后仍呈现微幅波动。

(2) 滚柱轴端与保持架动态接触载荷受齿轮副激励的影响较为显著,同样呈现周期性波动,且接触载荷为齿轮副的 10.3 倍,故该位置的承载特性应在设计 PRSM 时予以重视。

(3) 丝杠转速增大,各接触副接触载荷稳态值不变;螺纹副接触载荷曲线达到稳态时间减少,同时波动增大;齿轮副和滚柱轴端与保持架接触载荷曲线波动周期减小且产生相位差。

(4) 螺母负载增大,与螺纹副和滚柱轴端与保持架动态接触载荷增大不同,齿轮副接触载荷随着负载增大而减小,表明螺纹副和保持架共同分担了齿轮副部分载荷,使得齿轮副接触载荷变小。

(5) 较大的摩擦系数不仅造成各接触副接触载荷幅值增大,而且接触载荷曲线会产生剧烈波动。因此,减小摩擦系数大小,是提高 PRSM 传动稳定性的手段之一。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] VELINSKY S A, CHU B, LASKY T A. Kinematics and efficiency analysis of the planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(1): 011016.
- [3] ABEVI F, DAIDIE A, CHAUSSUMIER M, et al. Static analysis of an inverted planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(4): 041020.
- [4] 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.
- [5] MA Shangjun, ZHANG Tao, LIU Geng, et al. Kinematics of planetary roller screw mechanism considering helical directions of screw and roller threads [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 459462.
- [6] JONES M H, VELINSKY S A. Kinematics of roller

- migration in the planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(6): 061006.
- [7] JONES M H, VELINSKY S A. Contact kinematics in the roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(5): 051003.
- [8] FU Xiaojun, LIU Geng, TONG Ruiting, et al. A nonlinear six degrees of freedom dynamic model of planetary roller screw mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 119: 22-36.
- [9] 张文杰, 刘更, 马尚君, 等. 不同安装方式下行星滚柱丝杠副载荷分布研究 [J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(2): 229-236.
- ZHANG Wenjie, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Load distribution of planetary roller screw mechanism with different installations [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(2): 229-236.
- [10] 佟瑞庭, 刘更, 史佑民, 等. 螺纹牙型角对行星滚柱丝杠副接触特性影响研究 [J]. 机械设计, 2016, 33(5): 31-34.
- TONG Ruiting, LIU Geng, SHI Youmin, et al. Studies on the effect of the thread vertex on the contact characteristics of planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(5): 31-34.
- [11] 郭辉, 佟瑞庭, 刘更, 等. 面向行星滚柱丝杠副载荷均布的螺纹牙修形方法 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 685-692.
- GUO Hui, TONG Ruiting, LIU Geng, et al. Thread modification method for load balance on planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(4): 685-692.
- [12] 姚琴, 吴立言, 刘更, 等. 行星滚柱丝杠副弹塑性接触分析 [J]. 机械传动, 2016, 40(11): 106-110, 116.
- YAO Qin, WU Liyan, LIU Geng, et al. Elastic-plastic contact analysis of the planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(11): 106-110, 116.
- [13] 杨家军, 韦振兴, 朱继生, 等. 行星滚柱丝杠副载荷分布及刚度计算 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 1-4.
- YANG Jiajun, WEI Zhenxing, ZHU Jisheng, et al. Calculation of load distribution of planetary roller screws and static rigidity [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(4): 1-4.
- [14] 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.
- [15] 付永领, 甘发金, 祁晓野, 等. 行星滚柱丝杠副负载对摩擦力矩的影响 [J]. 机械传动, 2016, 40(5): 116-119.
- FU Yongling, GAN Fajin, QI Xiaoye, et al. Influence of load on friction moment in roller screw [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(5): 116-119.
- [16] 郑正鼎, 陈兵奎, 杜兴, 等. 差动式行星滚柱丝杠承载特性分析 [J]. 重庆大学学报, 2020, 43(12): 23-32.
- ZHENG Zhengding, CHEN Bingkui, DU Xing, et al. Analysis of bearing characteristics of differential planetary roller screw [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(12): 23-32.
- [17] 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.
- [18] 周建星, 孙文磊, 曹莉, 等. 行星齿轮传动系统碰撞振动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(3): 16-21.
- ZHOU Jianxing, SUN Wenlei, CAO Li, et al. Vibration characteristics of planetary gear transmission [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 16-21.
- [19] 陶庆, 孙文磊, 周建星. 考虑齿圈柔性的行星传动系统固有特性与灵敏度研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 113-120.
- TAO Qing, SUN Wenlei, ZHOU Jianxing. Research on inherent characteristics and sensitivities of planetary gear transmission [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 113-120.
- [20] 王成龙, 周建星, 孙文磊, 等. 行星齿轮传动柔性齿圈齿根动应力计算及光纤光栅检测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 122-132.
- WANG Chenglong, ZHOU Jianxing, SUN Wenlei, et al. Dynamic stress calculation and experimental comparative analysis for flexible ring gear root of planetary gear transmission system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 122-132.
- [21] 冯诗愚, 高秀峰, 李云, 等. 新型内啮合齿轮压缩机的齿间接触力研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 46-49, 58.
- FENG Shiyu, GAO Xiufeng, LI Yun, et al. Contact force between gears for a new type of internal-meshing gear compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 46-49, 58.
- [22] 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: 19-24.

(下转第 30 页)

- [22] GAO Han, DE VOLDER M, CHENG Tinghai, et al. Tribological property investigation on a novel pneumatic actuator with integrated piezo actuators [J]. Tribology International, 2015, 86: 72-76.
- [23] GAO Han, DE VOLDER M, CHENG Tinghai, et al. A pneumatic actuator based on vibration friction reduction with bending/longitudinal vibration mode [J]. Sensors and Actuators: Physical, 2016, 252: 112-119.
- [24] QIAN Pengfei, PU Chenwei, LIU Lei, et al. Development of a new high-precision friction test platform and experimental study of friction characteristics for pneumatic cylinders [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(6): 065001.
- [25] QIAN Pengfei, TAO Guoliang, LIU Hao, et al. Globally stable pressure-observer-based servo control of an electro-pneumatic clutch actuator [J]. Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(11): 1483-1493.
- (编辑 赵炜 杜秀杰)

(上接第 21 页)

- [23] 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.
- [24] 张文杰. 行星滚柱丝杠副螺纹牙载荷分布计算模型与方法 [D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [25] MA Shangjun, WU Linping, FU Xiaojun, et al. Modelling of static contact with friction of threaded surfaces in a planetary roller screw mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 139: 212-236.
- (编辑 赵炜 杜秀杰)