

差动式行星滚柱丝杠副承载特性分析及修形设计

乔冠¹ 张校民¹ 廖荣¹ 唐术锋¹ 马尚君²

(1. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区先进制造技术重点实验室, 呼和浩特 010051)

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

摘要:【目的】差动式行星滚柱丝杠副是一种丝杠螺纹与滚柱环槽、滚柱环槽与螺母环槽相啮合的新型传动机构。研究了一种新型的五段式差动式行星滚柱丝杠副的承载特性。【方法】基于有限元法,对五段式差动式行星滚柱丝杠副建立有限元分析模型,进行了承载特性分析,并分析了不同设计参数对承载特性的影响,对环槽牙进行了修形设计。【结果】结果表明,滚柱与螺母接触段的应力、环槽牙载荷和应变均大于滚柱与丝杠接触段;滚柱与丝杠接触的2段中,应力、环槽牙载荷和应变的最大值均位于滚柱与丝杠啮合接触处的最左端;滚柱与螺母接触的3段中,应力和应变的最大值均位于滚柱与螺母啮合接触处的最右端。这表明,差动式行星滚柱丝杠副中存在载荷分布不均的现象。环槽牙相关设计参数对其载荷分布有着重要影响。当齿面圆弧半径为1.5 mm、环槽牙角度为50°和环槽牙倒角半径为0.02 mm时,滚柱与丝杠接触段的环槽牙承载最为均匀。当齿顶修形量为0.63 mm或齿根修形量为0.84 mm时,滚柱与丝杠接触段的环槽牙承载和应力分布均匀。修形设计可使滚柱环槽牙承载不均的现象得到有效改善,有利于延长差动式行星滚柱丝杠副的使用寿命。

关键词: 差动式行星滚柱丝杠副; 有限元法; 承载特性分析; 设计参数; 修形设计

中图分类号: TH132 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2026.03.001

0 引言

行星滚柱丝杠副(Planetary Roller Screw Mechanism, PRSM)是一种将旋转运动变为直线运动的新型传动机构^[1-2],具有承载能力强^[3]、推力大^[4]和精度高^[5]等优点,主要应用于航空航天、医疗器械以及精密机床等^[6-8]领域。差动式行星滚柱丝杠副(Differential Planetary Roller Screw Mechanism, DPRSM)是一种结构简明的行星滚柱丝杠副,适用于高速重载的工作场合。

对于行星滚柱丝杠副承载特性的研究,ABEVI等^[9]提出一种计算PRSM静态载荷分布和轴向刚度的方法,采用横杆、梁和非线性弹簧的结构建模,考虑了机构的细节,对载荷分布和轴向刚度进行了准确计算,对计算结果与三维有限元模型的结果进行了比较,并对参数进行了研究。KIM等^[10]研究了PRSM的接触特性和静态承载能力,通过赫兹接触理

论建模,推导了关键计算式,使用有限元验证了理论模型的准确性。YAO等^[11]提出一种改进的迭代算法数学模型,解决了PRSM因加工误差而导致丝杠接触的相关问题;同时,建立了PRSM的接触模型,提出一种基于过程的参数化方法,以精确计算随参数变化的接触特性。MENG等^[12]研究了丝杠错位对PRSM接触特性的影响,通过有限元分析验证了数值结果,发现丝杠错位对载荷分布有影响。BLINOV等^[13]研究了剖面角对载荷分布不均的影响,并提出平衡倾覆转矩的方法。DU等^[14]建立了考虑摩擦因数和表面微观形貌的PRSM载荷分布模型及引入表面接触系数的改良模型,详细分析了多种因素对PRSM性能的具体影响。MIAO等^[15-16]针对PRSM考虑多种因素,提出一个综合考虑径向载荷、转矩和螺纹修正的多滚柱梁-杆-弹簧模型;同时,结合螺纹的牵引速度和载荷分布,考虑轴向热误差,建立了改进的

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52265009); 中国博士后科学基金项目(2024M762956); 内蒙古自然科学基金项目(2024LHMS05009); 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”项目(NJYT24028); 内蒙古自治区“英才兴蒙”工程团队项目(2025TEL02)

作者简介: 乔冠,男,1990年生,内蒙古自治区呼和浩特人,博士,副教授; 主要研究方向为行星滚柱丝杠传动与人形机器人一体化关节技术; qiaoguan@imut.edu.cn。

唐术锋(通信作者),男,1981年生,内蒙古自治区赤峰人,博士,教授; 主要研究方向为动力学与控制、极端环境机电装备设计及系统集成技术、特殊服役机器人; tangshufeng@imut.edu.cn。

引用格式: 乔冠,张校民,廖荣,等. 差动式行星滚柱丝杠副承载特性分析及修形设计[J]. 机械传动,2026,50(3):1-10.

QIAO Guan, ZHANG Xiaomin, LIAO Rong, et al. Bearing characteristic analysis and modification design of differential planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2026, 50(3): 1-10.



免费获取

阿查德磨损模型。XIAO等^[17]通过等效弹簧建模优化PRSM,显著提高了承载能力和传递效率,减小了变形,并验证了数值解和多目标优化的可行性。HE等^[18]基于PRSM的啮合原理,提出一种三维参数化接触特性分析方法。张文杰等^[19-20]在考虑材料、结构和安装等因素的基础上,提出PRSM不同安装情况下的螺纹载荷分布模型,发现主要影响因素为材料参数、结构参数和安装方式;同时,研究了PRSM螺纹载荷的均匀设计,提出参数设计准则,分析了参数对载荷分布的影响。结果表明,需要寻找适合的轴段刚度组合以实现载荷均匀分布。刘淑敏等^[21]针对不同的安装方式,建立了PRSM在不同工作温度下的有限元模型,分析了安装方式、载荷条件和工作温度对载荷分布的影响,发现温度对丝杠侧的影响大于螺母侧,在受压状态下载荷分布较佳。刘荣荣等^[22]提出一种基于凸凹接触的啮合方式,基于空间啮合理论推导出螺纹曲面方程和空间啮合方程,并基于赫兹接触理论和变形协调方程建立了负载分布模型。付晓军等^[23]研究了柱销式双螺母PRSM,建立了其静力学模型,验证了其准确性,分析了初始预紧力对系统性能的影响。目前,对DPRSM的研究较少,承载特性研究也仅有三段式。郑正鼎等^[24]结合赫兹接触理论和弹塑性力学,对三段式DPRSM滚柱载荷分布和承载能力进行了理论计算。

相比于三段式,五段式DPRSM的设计对承载能力与寿命有重要影响。本文采用有限元法,对五段式DPRSM建立有限元模型,分析其承载特性,并对滚柱环槽牙进行修形设计,系统分析了修形量对DPRSM的承载能力的影响规律。

1 DPRSM 结构组成

DPRSM主要由丝杠、滚柱、螺母、保持架和弹性挡圈组成,图1为DPRSM三维模型示意图。DPRSM与标准式行星滚柱丝杠副的结构和工作原理相似。不同之处在于DPRSM的滚柱采用了两种传动结合的设计,分别为与螺母之间采用螺旋升角为0的环槽-环槽传动设计、与丝杠之间采用螺旋升角为0的环槽-螺旋升角不为0的螺纹传动设计,这种巧妙的设计使得机构在传动时获得了较大的减速比。

目前,国内关于DPRSM的承载特性研究中,滚柱的设计仅有三段式,其中,滚柱与螺母接触段为2段、滚柱与丝杠接触段为1段,三段的排列顺序为滚柱与螺母接触段、滚柱与丝杠接触段和滚柱与螺母接触段。本文的滚柱采用五段式设计,其中,滚柱与螺母接触段为3段、滚柱与丝杠接触段为2段,五段的排列顺序为滚柱与螺母接触段、滚柱与丝杠接触段、滚柱与螺母接触段、滚柱与丝杠接触段和滚柱与螺母接触段。

触段、滚柱与螺母接触段、滚柱与丝杠接触段和滚柱与螺母接触段。滚柱两端的环槽型设计可以起到标准式行星滚柱丝杠副中内齿圈的作用,防止滚柱倾斜。

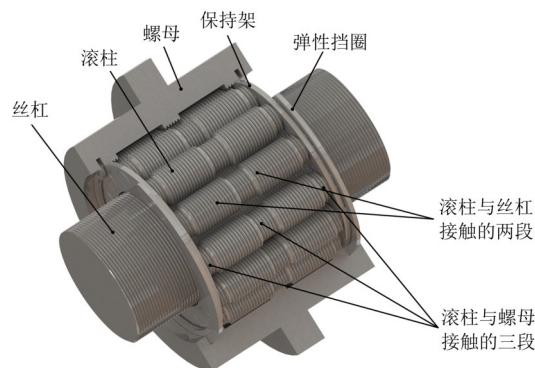


图1 DPRSM三维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the DPRSM 3D model

当DPRSM受载时,以滚柱为研究对象,螺纹螺旋角的存在使丝杠与滚柱的接触点在空间形成螺旋状的线接触。如图2所示,接触产生的力可沿接触点的法线分解为3个相互垂直的分量。

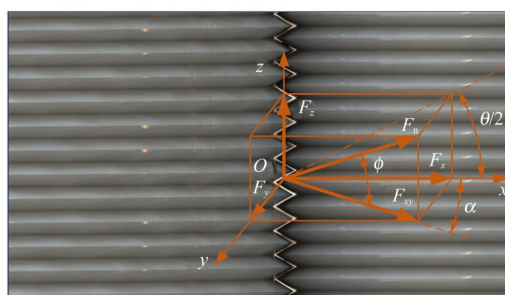


图2 接触力分解

Fig. 2 Contact force decomposition

3个方向的接触力可分别表示为

$$F_x = F_{xy} \cos \alpha = F_n \cos \phi \cos \alpha \quad (1)$$

$$F_y = F_{xy} \sin \alpha = F_n \cos \phi \sin \alpha \quad (2)$$

$$F_z = F_n \sin \phi \quad (3)$$

式中, F_x 为法向接触载荷的轴向分力,N; F_{xy} 为法向接触载荷切向分力与轴向分力的合力,N; α 为螺旋升角,(°); F_n 为法向接触载荷,N; ϕ 为法向接触角,(°); F_y 为法向接触载荷的切向分力,N; F_z 为法向接触载荷的径向分力,N。

2 DPRSM有限元模型的建立

DPRSM的三维模型主要零件的设计参数如表1所示。由于DPRSM结构复杂、计算收敛难度大,为提高计算效率与精度,根据DPRSM的承载特性,对DPRSM模型进行简化处理。简化步骤如下所述。

1) 保留内部结构中螺纹牙啮合的部分,去除未啮合的部分。

2) 去除保持架等对DPRSM承载特性分析无影响的部分。

响的结构,用软件的约束条件来模拟保持架等结构对 DPRSM 的约束。

表1 主要零件设计参数

Tab.1 Design parameters of main parts 单位: mm

名称	大径	小径	螺距	环槽间距
丝杠	40	38.24	1	—
滚柱与丝杠接触段	12	10.24	—	1
滚柱与螺母接触段	10	8.24	—	1
螺母	60.48	58.72	—	1

- 3) DPRSM 中结构的材料各向同性。
- 4) 将 DPRSM 中滚柱的环槽牙简化为三角形环槽牙。
- 5) 为提高网格质量,对丝杠与螺母进行分块处理。
- 6) 因为 DPRSM 具有对称性,且每个滚柱受载的变化规律相同,故取整个模型的 1/12 进行仿真。

简化后的 DPRSM 模型如图 3 所示。将简化模型导入有限元分析软件中,设置的约束条件如图 4 所示。首先,在滚柱与丝杠、螺母的螺纹牙接触面设置接触,其中,滚柱与丝杠之间存在 32 对接触、滚柱与螺母之间存在 11 对接触;同时,在丝杠左端施加固定支撑约束,丝杠右端施加位移约束;在螺母和滚柱左右两端施加位移约束;在螺母外表面施加圆柱形支撑约束,径向与切向设置为固定,轴向设置为自由;并在螺母和丝杠轴向两端施加无摩擦支撑,来代替对称约束;最后,在螺母法兰左侧施加一个力约束,力的大小为 3 000 N。

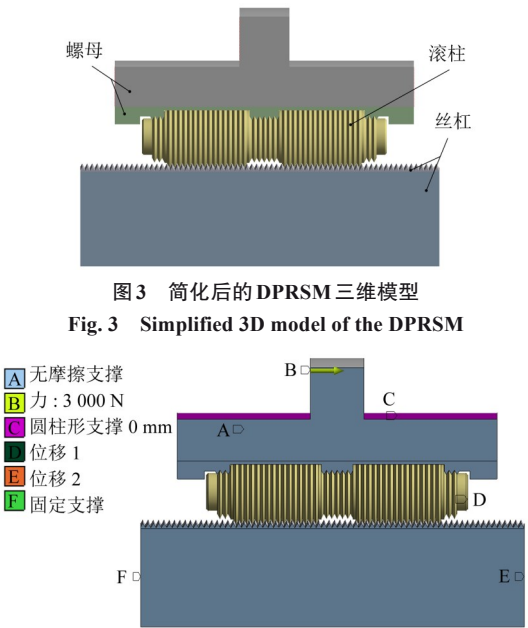


图3 简化后的 DPRSM 三维模型
Fig.3 Simplified 3D model of the DPRSM

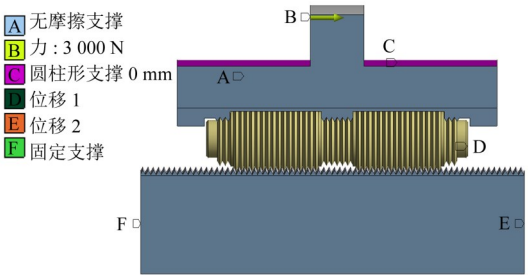


图4 DPRSM 约束条件
Fig.4 DPRSM constraint conditions

由于 DPRSM 结构复杂,为提高计算精度,在进行网格划分时,对 DPRSM 模型进行分区域网格划

分。对规则的区域进行六面体网格划分,存在螺纹牙等不规则的区域进行四面体网格划分,滚柱与丝杠、螺母接触的位置附近进行网格加密划分。网格划分结果如图 5 所示。其中,模型网格单元数为 4 474 609,网格平均单元质量为 0.88。

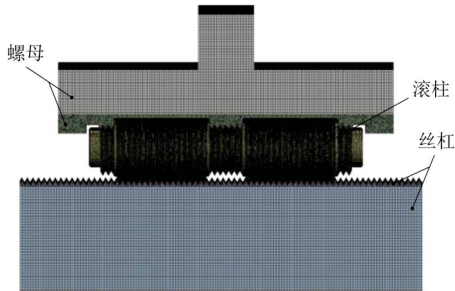


图5 DPRSM 网格划分
Fig.5 DPRSM grid division

3 DPRSM 承载特性分析

对建立的 DPRSM 有限元模型进行静载分析,得到的结果如图 6 所示。图 6~图 9 分别为 DPRSM 总变形云图、DPRSM 等效应力云图、环槽牙载荷分布图和 DPRSM 等效弹性应变云图。

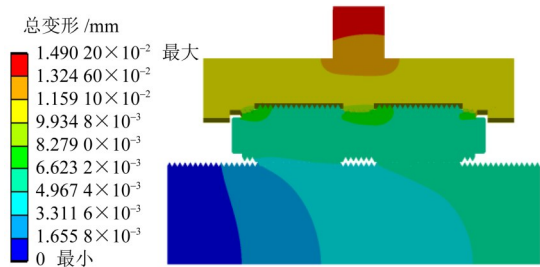
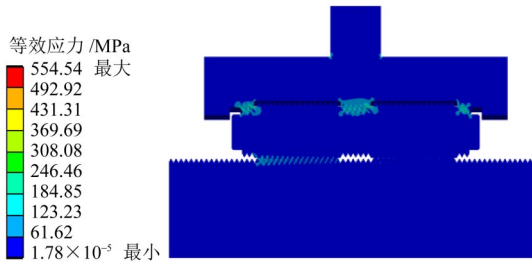


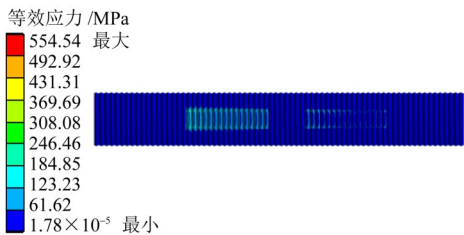
图6 DPRSM 总变形云图

Fig.6 Total deformation contour plot of the DPRSM

由图 6 可知,DPRSM 中变形最小处为丝杠左端处,变形最大处为螺母法兰处,这与丝杠左端设置为固定约束、螺母法兰施加力的约束设置相符合。同时,滚柱与螺母接触段的变形大于滚柱与丝杠接触段。



(a) 总体剖面等效应力云图



(b) 丝杠等效应力云图

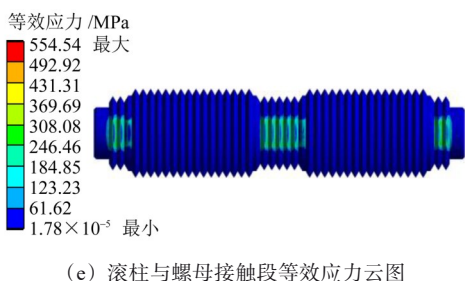
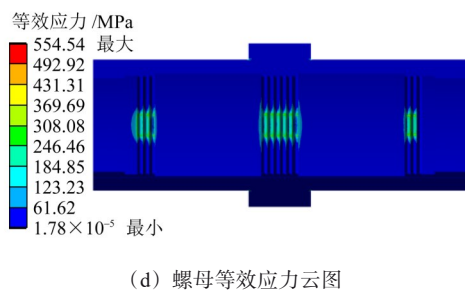
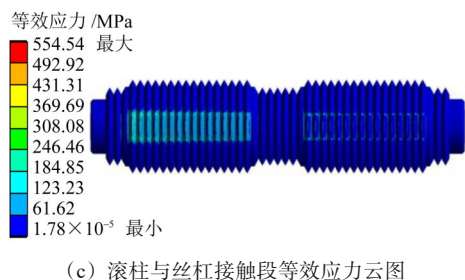


图7 DPRSM 等效应力云图

Fig. 7 DPRSM equivalent stress contour plot

为了更直接地通过颜色判定应力大小的趋势，统一了云图中的应力范围。在这一规定下，由图7可知，滚柱与螺母接触段应力大于滚柱与丝杠接触段，与总变形中结果相对应。这是因为滚柱与螺母接触段的啮合接触齿数少于滚柱与丝杠接触段的啮合接触齿数。同时，滚柱与丝杠接触的2段中，应力最大值均位于最左端的啮合接触处，应力最大值为260.70 MPa(由软件列表获得)，应力从左到右逐渐递减；滚柱与螺母接触的3段中，应力最大值均位于最右端的啮合接触处，应力最大值为554.54 MPa。DPRSM的滚柱与螺母之间独特的环槽-环槽传动设计使得滚柱与螺母之间的传动稳定性要优于滚柱与丝杠之间的传动稳定性。因此，本文主要对滚柱与丝杠接触段的承载特性进行分析^[25]。为了更直观地观察滚柱与丝杠之间的载荷分布情况，将滚柱上的啮合环槽牙从左到右依次排序，并提取环槽牙载荷的数据，绘制了环槽牙载荷分布图(图8)。

由图8可知，滚柱与丝杠接触的2段中，接触力的最大值均位于滚柱与丝杠啮合接触处的最左端，最大值分别为160.23 N和90.35 N，大部分载荷数值从左到右逐渐递减。由此可知，DPRSM中存在载荷分布不均的现象。

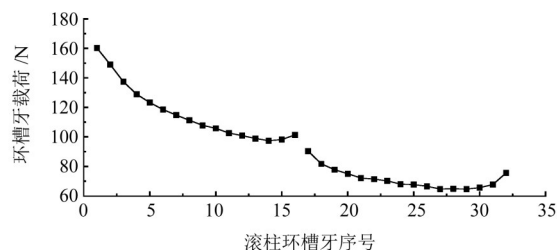


图8 环槽牙载荷分布图

Fig. 8 Load distribution diagram of the annular groove teeth

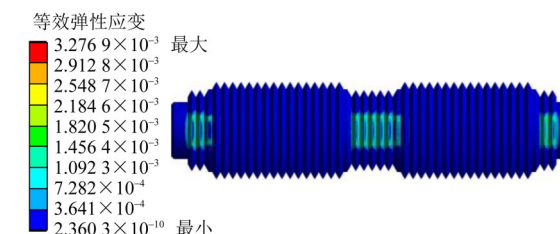
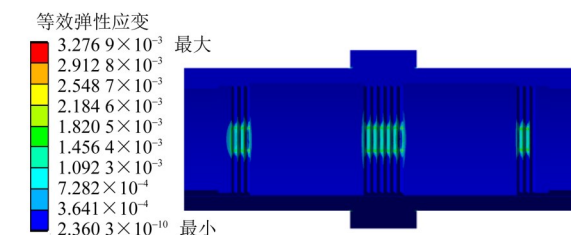
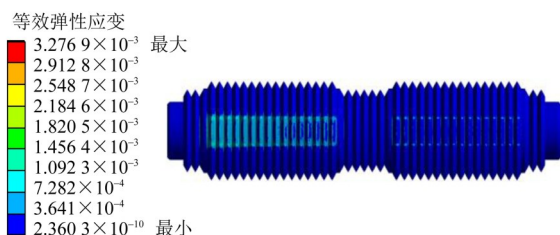
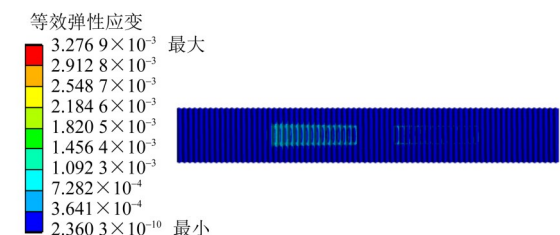
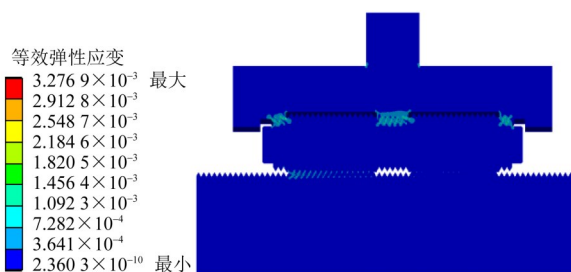


图9 DPRSM 等效弹性应变云图

Fig. 9 Equivalent elastic strain contour plot of the DPRSM

由图9可知,滚柱与螺母接触段应变大于滚柱与丝杠接触段。滚柱与丝杠接触的2段中,最大应变均位于啮合接触处的最左端,最大应变值为0.0013744,应变值从左到右逐渐递减;滚柱与螺母接触的3段中,最大应变均位于啮合接触处的最右端,最大应变值为0.0032769。

图10为有限元解与文献[26]^[39-42]中的丝杠-滚柱接触侧螺纹牙载荷分布不均系数对比图。其中,载荷分布不均系数为单个环槽牙载荷与环槽牙平均载荷的比值。由于滚柱与丝杠接触的2段中最后一个环槽牙存在不稳定的情况,因此,只取这两段的前15个环槽牙载荷进行数据对比。

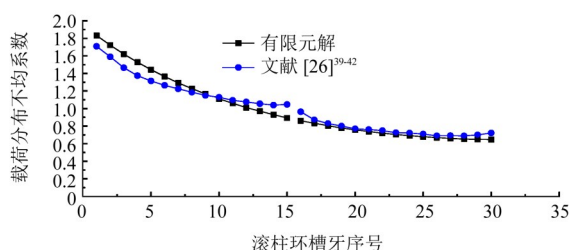


图10 丝杠-滚柱接触侧螺纹牙载荷分布不均系数对比图

Fig. 10 Comparison diagram of the uneven load distribution coefficient of thread teeth on the contact side of the lead screw and the roller

由图10可知,有限元解与文献[26]^[39-42]中的载荷分布不均系数基本吻合,验证了本文有限元模型的准确性。

根据上述仿真发现,由于滚柱与螺母接触段的啮合接触齿数少于滚柱与丝杠接触段的啮合接触齿数,滚柱与螺母接触段总变形、应力和应变均大于滚柱与丝杠接触段。滚柱与丝杠接触的2段中,等效应力、环槽牙载荷和等效弹性应变的最大值均位于啮合接触处的最左端;滚柱与螺母接触的3段中,等效应力和等效弹性应变的最大值均位于啮合接触处的最右端。由此表明,DPRSM在传动过程中存在载荷分布不均的现象。在DPRSM承受载荷较大的情况下,不均匀的载荷分布会缩短DPRSM的使用寿命。因此,有必要对DPRSM的环槽牙进行修形设计。

4 DPRSM设计参数研究

在设计DPRSM滚柱环槽牙(将螺旋升角为0的螺纹牙统称为环槽牙,环槽牙属于螺纹牙)的过程中,需要考虑到齿面圆弧半径 R 、环槽牙角度 θ 和环槽牙倒角半径 r 等多种设计参数,如图11所示。相关设计参数改变,会影响到环槽牙的承载性能。故需要对设计参数进行系统性的分析研究,探讨其对承载性能的影响。

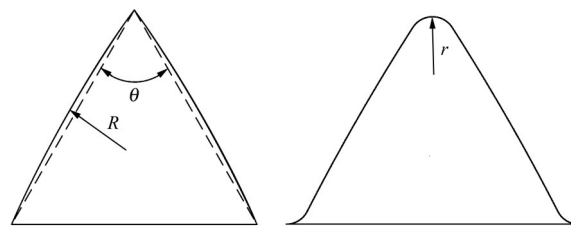


图11 设计参数示意图

Fig. 11 Schematic diagram of design parameters

同时,可用均方差来评估环槽牙载荷的波动。均方差越小,环槽牙载荷越接近平均值。环槽牙载荷的平均值和均方差^[27]分别为

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (4)$$

式中, F_i 为滚柱与丝杠接触段中的环槽牙载荷, N ;滚柱与丝杠接触段 i 的取值为1,2,3,...,32。

$$S_F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (5)$$

式中, S_F 为环槽牙载荷的均方差,表示环槽牙载荷偏离环槽牙载荷平均值的程度, N 。 S_F 值越小,环槽牙载荷整体波动越小。

4.1 齿面圆弧半径变量结果分析

设置 R 分别为1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5、10.5 mm,建立与上文相同的有限元模型,进行承载特性分析。图12为滚柱与丝杠接触段环槽牙排列顺序图。在图12中,将滚柱与丝杠接触段的环槽牙按序号从1到32依次排序。得到的仿真结果如图13(不同齿面圆弧半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图)和表2(不同齿面圆弧半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况)所示。

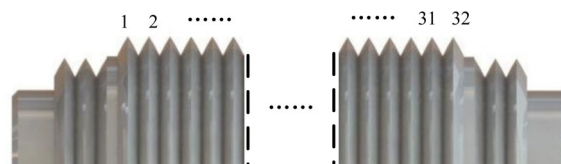


图12 滚柱与丝杠接触段环槽牙排列顺序图

Fig. 12 Sequence diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the lead screw

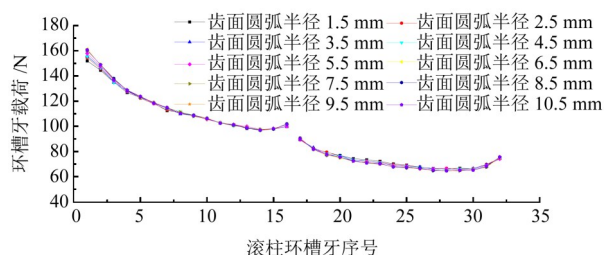


图13 不同齿面圆弧半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图

Fig. 13 Load distribution diagram of annular groove teeth of the contact section between the roller and the screw under different tooth surface arc radii

表2 不同齿面圆弧半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况
Tab. 2 Load variation of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth surface arc radii

变量/mm	最大值/N	最小值/N	均方差 S_F /N
1.5	151.97	66.24	26.58
2.5	154.37	66.09	26.96
3.5	155.85	65.75	27.31
4.5	155.42	65.67	27.24
5.5	157.91	65.56	27.65
6.5	161.37	64.84	28.39
7.5	160.23	64.57	28.30
8.5	160.19	64.67	28.32
9.5	160.37	64.62	28.31
10.5	160.79	64.57	28.29

由图13和表2可知,齿面圆弧半径对承载不均现象有着重要影响。随着变量的不断递增,均方差数值趋于增大,承受载荷值趋于不均匀,均方差呈现出先增加后平稳的趋势。这表明,在变量范围内,随着变量的不断增加,载荷逐渐趋于不均。当环槽牙齿面圆弧半径为1.5 mm时,均方差最小,承受载荷最接近平均值,环槽牙载荷最大值由160.23 N降为151.97 N、最小值由64.57 N升为66.24 N,环槽牙受载不均的现象得到改善。

4.2 环槽牙角度变量结果分析

设置 θ 分别为50°、60°、70°、80°、90°、100°、110°和120°,建立与上文相同的有限元模型,并进行承载特性分析。得到的仿真结果如图14(不同环槽牙角度下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图)和表3(不同环槽牙角度下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况)所示。

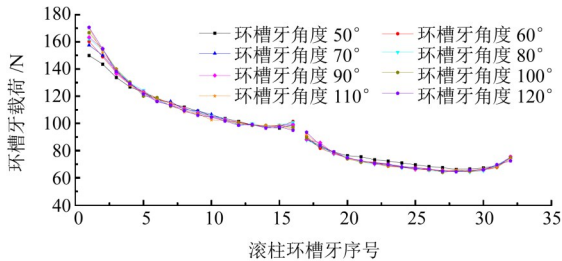


图14 不同环槽牙角度下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图
Fig. 14 Load distribution diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different annular groove tooth angles

由图14和表3可知,环槽牙角度对承载不均现象同样有着重要影响。随着变量的不断递增,均方差数值趋于增大,均方差呈现出先快速增加后平稳的趋势。这表明,在变量范围内,随着变量的不断增加,载荷逐渐趋于不均。当环槽牙角度为50°时,均方差最小,承受载荷最接近平均值,环槽牙载荷

最大值由160.23 N降为149.93 N、最小值由64.57 N升为66.20 N,环槽牙受载不均的现象得到改善。

表3 不同环槽牙角度下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况
Tab. 3 Load variation of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different annular groove tooth angles

变量/(°)	最大值/N	最小值/N	均方差 S_F /N
50	149.93	66.20	26.31
60	160.23	64.57	28.30
70	157.52	65.20	28.12
80	162.15	64.31	28.99
90	163.34	64.97	28.75
100	166.74	64.04	29.18
110	170.22	65.04	29.19
120	170.58	64.42	29.22

4.3 环槽牙倒角半径变量结果分析

设置 r 分别为0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20 mm,建立与上文相同的有限元模型,进行承载特性分析。得到的仿真结果如图15(不同环槽牙倒角半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图)和表4(不同环槽牙倒角半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况)所示。

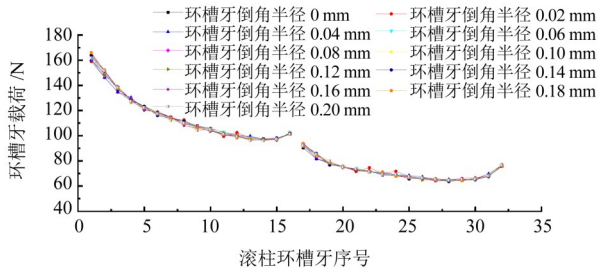


图15 不同环槽牙倒角半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图
Fig. 15 Load distribution diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different chamfering radii of the annular groove teeth

表4 不同环槽牙倒角半径下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况
Tab. 4 Load variation of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different chamfering radii of the annular groove teeth

变量/mm	最大值/N	最小值/N	均方差 S_F /N
0	160.23	64.57	28.30
0.02	158.92	65.06	27.39
0.04	160.39	64.97	27.66
0.06	161.62	64.71	28.04
0.08	164.02	63.95	28.48
0.10	164.28	64.00	28.67
0.12	163.23	64.21	28.35
0.14	163.89	63.59	28.51
0.16	165.82	63.97	28.58
0.18	165.94	64.40	28.52
0.20	161.89	64.81	28.12

由图 15 和表 4 可知，相较于前两种参数，环槽牙倒角半径的变化对环槽牙受载不均现象的改善幅度较为有限，但同样有着重要影响。随着变量的不断递增，均方差数值趋于增大。这表明，在变量范围内，随着变量的不断增加，载荷先趋于均匀，又逐渐趋于不均。当环槽牙倒角半径为 0.02 mm 时，均方差最小，承受载荷最接近平均值，均方差呈现出先下降后快速增加再平稳的趋势。环槽牙载荷最大值由 160.23 N 降为 158.92 N、最小值由 64.57 N 升为 65.06 N，环槽牙受载不均的现象得到改善。

通过上述有限元仿真发现，环槽牙相关设计参数对其载荷分布有着重要影响。当齿面圆弧半径为 1.5 mm、环槽牙角度为 50°、环槽牙倒角半径为 0.02 mm 时，滚柱与丝杠接触段环槽牙承载最为均匀。该结论为后续 DPRSM 环槽牙的相关参数优化设计提供了有限元研究基础。

5 DPRSM 修形设计

5.1 修形方法

DPRSM 中滚柱的修形方法主要有 3 种，第一种方法：通过改变滚柱环槽牙的厚度来改变载荷不均；第二种方法：通过改变滚柱环槽牙牙顶的高度来改变载荷不均；第三种方法：通过改变环槽牙牙根的深度来改变载荷不均。由于第一种方法在滚柱加工中难度较大，本文中选择不两种方法。滚柱环槽牙两种修形方法前后的对比分别如图 16 和图 17 所示。

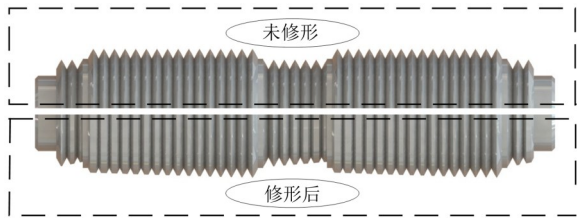


图 16 滚柱环槽牙牙顶修形前后对比图

Fig. 16 Comparative diagram of the roller annular groove tooth crest before and after modification

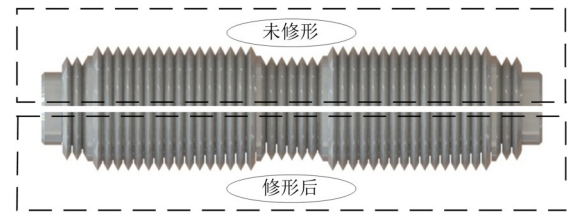


图 17 滚柱环槽牙牙根修形前后对比图

Fig. 17 Comparative diagram of the roller annular groove tooth root before and after modification

图 16 中，牙顶修形方法的具体操作：将滚柱环槽牙的牙顶处切削一定高度，滚柱与丝杠、螺母之间接触的环槽牙高度线性减小。这样做的结果是：在滚柱承载过程中，修形后环槽牙牙根上的弯曲应

力减小，接触面面积减小，接触面压力增大，使其更容易发生变形，从而使得接触的环槽牙承载更加均匀。该修形方法的修形量为滚柱上环槽牙牙顶的最大切削高度。

图 17 中，牙根修形是将滚柱环槽牙的根部切削一定深度，滚柱与丝杠、螺母之间接触的环槽牙根部深度线性减小。这样使得滚柱在承载的过程中，前端环槽牙悬臂变长，较小接触力就可以产生较大的弯矩，使其更容易发生变形，从而使得接触的环槽牙承载更加均匀。该修形方法的修形量为滚柱上环槽牙牙根的最大切削深度。

5.2 牙顶修形结果分析

设置牙顶修形量分别为未修形、0.07 mm、0.14 mm、0.21 mm、0.28 mm、0.35 mm、0.42 mm、0.49 mm、0.56 mm、0.63 mm 和 0.70 mm，建立与上文相同的有限元模型，进行承载特性分析。得到的仿真结果如图 18(不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图)和表 5(不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况)所示。为了更加直观地体现牙顶修形量对 DPRSM 的均载影响，将参数变量分别命名为变量序号 1~11，图 19 为取表 5 中最能代表均载情况的均方差数据绘制的不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙均方差变化图。

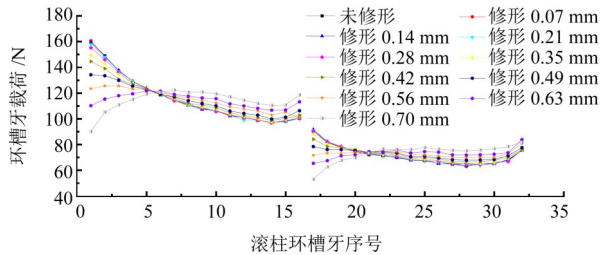


图 18 不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图

Fig. 18 Load distribution diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth crest modification amounts

由图 18 可知，修形前，滚柱与丝杠接触段的环槽牙载荷曲线波动幅度较大，受载不均；修形后，滚柱与丝杠接触段的环槽牙载荷曲线波动幅度减小，受载变得均匀。由表 5 与图 19 可知，当修形量较小时，结构承载变化明显；随着修形量的不断增加，均方差不断减小，载荷分布趋于均匀。当滚柱与丝杠接触段的环槽牙牙顶修形量为 0.63 mm 时，均方差最小，承受载荷最接近平均值。修形后，环槽牙载荷最大值由 160.23 N 降为 121.76 N、最小值由 64.57 N 升为 65.39 N，环槽牙受载不均的现象得到明显改善。同时也发现，当修形量过大时，部分环槽牙不能正常接触工作，使环槽牙载荷分布变得更不均匀。

表5 不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况
Tab. 5 Load variation of the annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth crest modification amounts

修形量/mm	最大值/N	最小值/N	均方差 S_p /N
0	160.23	64.57	28.30
0.07	160.69	62.90	28.38
0.14	159.37	63.77	28.24
0.21	157.81	63.65	27.91
0.28	155.22	64.44	27.41
0.35	149.46	65.08	26.73
0.42	144.59	66.57	25.94
0.49	134.21	68.01	25.00
0.56	125.60	70.07	24.10
0.63	121.76	65.39	23.59
0.70	122.43	53.03	24.11

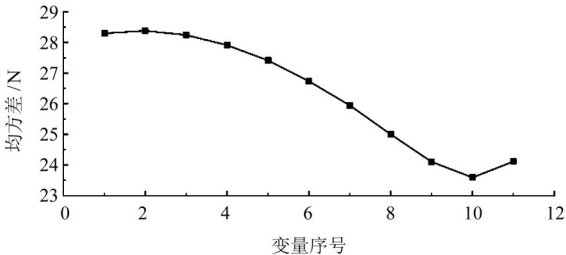


图19 不同牙顶修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙均方差变化图
Fig. 19 Mean square deviation variation diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth crest modification amounts

5.3 牙根修形结果分析

设置牙根修形量分别为未修形、0.07 mm、0.14 mm、0.21 mm、0.28 mm、0.35 mm、0.42 mm、0.49 mm、0.56 mm、0.63 mm、0.70 mm、0.77 mm、0.84 mm 和 0.91 mm，建立与上文相同的有限元模型，进行承载特性分析。得到的仿真结果如图 20(不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图)和表 6(不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况)所示。为了更加直观地体现牙根修形量对 DPRSM 的均载影响，将参数变量分别命名为变量序号 1~14，图 21 为取表 6 中最能代表均载情况的均方差数据绘制的不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙均方差变化图。

由图 20 可知，经修形后，滚柱与丝杠接触段的环槽牙载荷曲线波动幅度由过大逐渐减小，受载逐渐变得均匀。由表 6 与图 21 可知，随着修形量逐渐增加，结构承载变化由明显变为逐渐均匀；当滚柱与丝杠接触段的环槽牙牙根修形量为 0.84 mm 时，均方差最小，承受载荷最接近平均值。修形后，环槽牙载荷最大值由 160.23 N 降为 124.07 N、最小值由 64.57 N 升为 71.31 N，环槽牙受载不均的现象得到明

显改善。同时发现，齿根修形后的最小均方差为 22.61 N，略小于齿顶修形后的最小均方差(23.59 N)，由此证明，齿根修形后的均载效果较优于齿顶修形。

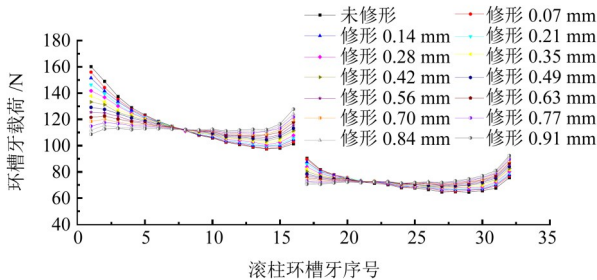


图20 不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙载荷分布图
Fig. 20 Load distribution diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth root modification amounts

表6 不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙受载变化情况
Tab. 6 Load variation of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth root modification amounts

修形量/mm	最大值/N	最小值/N	均方差 S_p /N
0	160.23	64.57	28.30
0.07	155.97	65.30	27.27
0.14	151.49	66.28	26.57
0.21	146.38	66.84	25.88
0.28	141.76	67.41	25.32
0.35	137.73	68.26	24.74
0.42	133.21	68.53	24.21
0.49	129.17	69.10	23.80
0.56	125.38	69.68	23.35
0.63	122.56	69.90	23.06
0.70	120.18	70.66	22.85
0.77	121.77	71.10	22.70
0.84	124.07	71.31	22.61
0.91	127.79	70.57	22.67

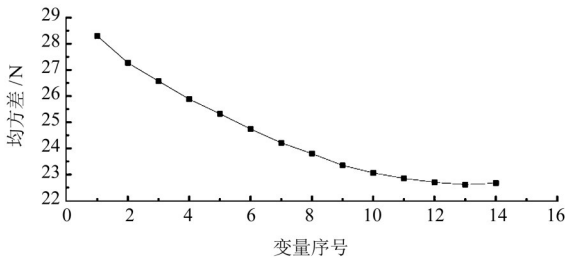


图21 不同牙根修形量下滚柱与丝杠接触段环槽牙均方差变化图
Fig. 21 Mean square deviation variation diagram of annular groove teeth in the contact section between the roller and the screw under different tooth root modification amounts

通过上述有限元仿真发现，当进行齿顶修形，修形量为 0.63 mm 时，滚柱与丝杠接触段环槽牙应力分布均匀、承载均匀。当进行齿根修形，修形量为 0.84 mm 时，滚柱与丝杠接触段环槽牙应力分布

均匀、承载均匀。故修形设计可使滚柱环槽牙承载不均的现象得到明显改善,有利于延长 DPRSM 的使用寿命。该结论为后续 DPRSM 环槽牙的修形设计提供了研究基础。

6 结论

对 DPRSM 建立有限元模型,进行了承载特性分析;在此基础上,研究了相关设计参数对环槽牙承载特性的影响,并对 DPRSM 进行了修形设计。得出以下结论:

1) 由于滚柱与螺母接触段的啮合接触齿数少于滚柱与丝杠接触段的啮合接触齿数,滚柱与螺母接触段的应力、环槽牙载荷和应变均大于滚柱与丝杠接触段。

2) 滚柱与丝杠接触的2段中,应力、环槽牙载荷和应变的最大值均位于啮合接触处的最左端;滚柱与螺母接触的3段中,应力和应变的最大值均位于啮合接触处的最右端。这表明,DPRSM 中存在载荷分布不均的现象。

3) 相关设计参数对环槽牙载荷分布有着重要影响。当齿面圆弧半径为1.5 mm、环槽牙角度为50°、环槽牙倒角半径为0.02 mm时,滚柱与丝杠接触段环槽牙承载最为均匀。

4) 当进行齿顶修形,修形量为0.63 mm时,滚柱与丝杠接触段环槽牙应力分布均匀、承载均匀。当进行齿根修形,修形量为0.84 mm时,滚柱与丝杠接触段环槽牙应力分布均匀、承载均匀。修形设计可使滚柱环槽牙承载不均的现象得到明显改善,有利于延长 DPRSM 的使用寿命。

参 考 文 献

- [1] MENG J J, DU X, LI Y M, et al. A multiscale accuracy degradation prediction method of planetary roller screw mechanism based on fractal theory considering thread surface roughness[J]. *Fractal and Fractional*, 2021, 5(4): 237.
- [2] YAO Q, ZHANG M C, LIU Y S, et al. Multi-objective optimization of planetary roller screw mechanism based on improved mathematical modelling [J]. *Tribology International*, 2021, 161: 107095.
- [3] HU R, WEI P T, LIU H J, 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.
- [4] 乔冠,郝志鹏,廖荣,等. 反向式行星滚柱丝杠副的螺纹牙修形设计[J]. *机械传动*, 2024, 48(4): 109-115.
QIAO Guan, HAO Zhipeng, LIAO Rong, et al. Thread tooth modification of the inverted planetary roller screw mechanism[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(4): 109-115.
- [5] 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.
- [6] LIU Y Q, WANG J S, CHENG H X, et al. Kinematics analysis of the roller screw based on the accuracy of meshing point calculation [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015 (6): 303972.
- [7] 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.
- [8] MA S J, LIU G, TONG R T, et al. A frictional heat model of planetary roller screw mechanism considering load distribution[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2015, 43 (2): 164-182.
- [9] ABEVI F, DAIDIÉ A, CHAUSSUMIER M, et al. Static load distribution and axial stiffness in a planetary roller screw mechanism [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2022, 138(1): 012301.
- [10] KIM N S, KIM K, JONG S. Contact analysis and static load carrying capacity of planetary roller screw mechanism [R/OL]. (2020-11-17). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-106438/v1>.
- [11] YAO Q, ZHANG M C, MA S J. Structural design for planetary roller screw mechanism based on the developed contact modelling [J]. *Tribology International*, 2022, 171: 107570.
- [12] MENG J J, DU X, ZHAO X, et al. Research on contact and wear characteristics of the planetary roller screw mechanism with screw misalignments[J]. *Lubricants*, 2022, 10(6): 115.
- [13] BLINOV D S, ZENKINA Y P, NAKHATAKYAN F G. Contact interactions of the roller in a planetary roller screw and their influence on the load capacity [J]. *Russian Engineering Research*, 2022, 42(9): 884-890.
- [14] DU X, CHEN B K, LIU R R, et al. Research on fractal model of load distribution and axial stiffness of planetary roller screw mechanism considering surface roughness and friction factor[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2022, 5(4): 2100399.
- [15] MIAO J C, DU X, LI C Y, et al. Load distribution and radial deformations for planetary roller screw mechanism with axial load, radial load and turning torque[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2024, 52(4): 1847-1873.
- [16] MIAO J C, DU X, LI C Y, et al. Lubrication and wear analysis of planetary roller screw mechanism with threaded surface roughness in thermal elastohydrodynamic lubrication[J]. *Tribology Transactions*, 2022, 65(6): 1069-1087.
- [17] XIAO Y L, FU J, ZHAO Y S, et al. Multi-objective optimization of planetary roller screw mechanism based on improved boundary condition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(11): 4479-4491.
- [18] HE H L, WEI P T, LIU H J, 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.
- [19] 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.
- [20] 张文杰, 刘更, 佟瑞庭, 等. 行星滚柱丝杠副螺纹牙均载设计方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(3):499-507.
ZHANG Wenjie, LIU Geng, TONG Ruiting, et al. Thread load balance design method of planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(3):499-507.
- [21] 刘淑敏, 刘更, 马尚君, 等. 不同工作温度下行星滚柱丝杠副载荷分布研究[J]. 机械传动, 2016, 40(5):14-19.
LIU Shumin, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Research of the load distribution of planetary roller screw mechanism under different working temperatures[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(5):14-19.
- [22] 刘荣荣, 陈永洪, 杜兴, 等. 凸凹接触式行星滚柱丝杠的啮合承载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(1):49-57.
LIU Rongrong, CHEN Yonghong, DU Xing, et al. Meshing and bearing characteristics of convex-concave contact planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(1):49-57.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 郑正鼎. 差动式行星滚柱丝杠传动特性理论研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022:45-46.
ZHENG Zhengding. Theoretical study on transmission characteristics of differential planetary roller screw[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022:45-46.
- [26] 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, 2017:39-42.
ZHANG Wenjie. Calculation model and method of load distribution of thread teeth of planetary roller screw pair[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017:39-42.
- [27] 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.

Bearing characteristic analysis and modification design of differential planetary roller screw mechanism

QIAO Guan¹ ZHANG Xiaomin¹ LIAO Rong¹ TANG Shufeng¹ MA Shangjun²

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

(2. Shaanxi Engineering Laboratory for Transmissions and Controls, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: [Objective] The differential planetary roller screw mechanism is a new type of transmission mechanism in which the screw thread is meshed with the roller ring groove, as well as the mesh between the roller ring groove and the nut ring groove. The bearing characteristics of a new type of five-stage differential planetary roller screw mechanism was investigated. [Methods] The analysis model was established and the bearing characteristics were analyzed based on the finite element method. Besides, the influence of different design parameters on the bearing characteristics was analyzed. Finally, the modification design was carried out. [Results] The results show that the stress, the load and strain of the ring groove of the contact section between the roller and the nut are larger than those of the contact section between the roller and the screw. The maximum values of stress, ring groove load and strain in the two sections of the contact between the roller and the screw are located at the leftmost end of the meshing contact. The maximum values of stress and strain in the three sections of the contact between the roller and the nut are located at the rightmost end of the meshing contacts. It is proved that there is an uneven load distribution in the differential planetary roller screw mechanism. The relevant design parameters of the ring groove teeth have an important influence on the load distribution. When the tooth surface arc radius is 1.5 mm, the angle of the ring groove teeth is 50° and the chamfer radius of the ring groove teeth is 0.02 mm, the load of the ring groove teeth in the contact section between the roller and the screw is the most uniform. When the tooth crest modification amount is 0.63 mm or the tooth root modification amount is 0.84 mm, the bearing and stress distribution of the ring groove teeth in the contact section between the roller and the screw are uniform. The modification design effectively improves the uneven bearing of the roller ring groove teeth, which is beneficial to prolong the service life of the differential planetary roller screw mechanism.

Key words: Differential planetary roller screw mechanism; Finite element method; Bearing characteristic analysis; Design parameter; Modification design
(编辑: 贾文倩)