

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.001

# 面向高端装备的行星滚柱丝杠副研究

张建润, 焦浩宇, 郭江波

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:**行星滚柱丝杠副作为兼具高承载能力、高精度和长寿命的精密传动机构,近年来受到广泛关注,其多点啮合特性使其在机器人、航空航天及医疗设备等领域展现应用潜力,但复杂的啮合机制、多参数耦合及高制造精度要求也带来挑战。所建系统综述了行星滚柱丝杠副的研究现状及涵盖构型原理、运动学与动力学建模、啮合接触、载荷分配与刚度特性,并总结了螺纹磨削、螺旋面成形与装配误差控制等制造工艺研究,阐明了工艺精度对性能与寿命的影响,同时梳理了动力学与噪声机制研究进展,揭示了几何误差、摩擦滑移与热效应的影响,并介绍了相关控制策略。概述了其在高端装备中的应用与发展趋势,指出亟需在多物理场耦合建模、数字孪生制造、试验验证及可靠性设计等方面进一步突破。

**关键词:**行星滚柱丝杠副; 高端装备; 参数设计; 工艺制造; 振动与噪声; 多物理场耦合

**中图分类号:** TH133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0001-12

## Review on Planetary Roller Screw Mechanisms for High-end Equipment

ZHANG Jianrun, JIAO Haoyu, GUO Jiangbo

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Although the planetary roller screw mechanism (PRSM), featuring high load capacity, precision and service life, has gained wide attention in recent years, with its multi-point meshing manifesting its application potential in robotics, aerospace, and medical equipment, its complex meshing mechanism, multi-parameter coupling, and stringent manufacturing accuracy pose challenges. This paper reviews recent research on PRSM, including structural types, kinematic and dynamic modeling, meshing contact, load distribution, and stiffness characteristics. Advances in manufacturing processes such as thread grinding, helical surface formation, and assembly error control are summarized, highlighting the impact of accuracy on performance and service life. Progress in dynamics and noise studies is outlined, focusing on geometric errors, friction, and thermo-mechanical effects, along with related control strategies. Engineering applications and future trends are discussed, emphasizing the need for breakthroughs in multi-physics coupled modeling, digital twin-based manufacturing, experimental validation, and reliability-oriented design.

**Keywords:** planetary roller screw mechanism; high-end equipment; parameter design; manufacturing processes; vibration and noise; multi-physics coupling

## 0 引言

线性传动系统能将旋转运动转化为直线运动,是高端装备中满足精准定位和稳定传力需求的核心部件,被广泛应用于精密设备、车辆与机器人等领域。

传统的梯形丝杠副依赖滑动摩擦、效率和精度有限,仅适用于低速场合<sup>[1]</sup>;滚珠丝杠副虽然效

率较高,但受制于滚珠数量和尺寸,在高速重载下易发生滑移和碰撞,导致振动与寿命下降。相比之下,行星滚柱丝杠副采用多滚柱螺旋面多点啮合,在相同尺寸下可实现更高的传动精度、承载能力和寿命,并具备更优的抗冲击与集成化特性<sup>[2]</sup>,正逐步取代部分液压、气动及传统丝杠传动,成为机电伺服驱动系统的核心部件<sup>[3]</sup>。

本文系统地综述了近几十年来行星滚柱丝杠

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52275092)

**第一作者简介:**张建润(1962—),男,江苏镇江人,教授,博士生导师,中国机械动力学学会常务理事,江苏省振动工程学会常务理事,江苏省数控机床中心副主任。近年来先后承担及参与了欧共体项目、大量国家、部省和地方的自然科学基金、重大专项项目、863项目等。长期从事机械动力学、噪声与振动控制、结构动态设计与优化等研究,发表SCI及EI收录论文80余篇,撰写教材3部,获得省、部级奖10余项,拥有10多项发明专利,zhangjr@seu.edu.cn。

副 (PRSM) 的发展与研究进展,重点涵盖构型原理、参数设计、啮合接触、刚度与承载、动力学与噪声机制、制造工艺以及工程应用,并对未来的发展方向进行展望,以期对相关研究与工程应用提供参考。

## 1 行星滚柱丝杠副的各类构型及原理

滚柱丝杠从发明到发展的这几十年,随着不同的工作场景发展出了多种类型,按照结构原理分类,行星滚柱丝杠可分为标准式、反向式、循环式以及差动式。本节将重点介绍这 4 种不同类型的行星滚柱丝杠构造原理,以及各自不同的性能特点和适用场景,各类构型原理图如图 1 所示。

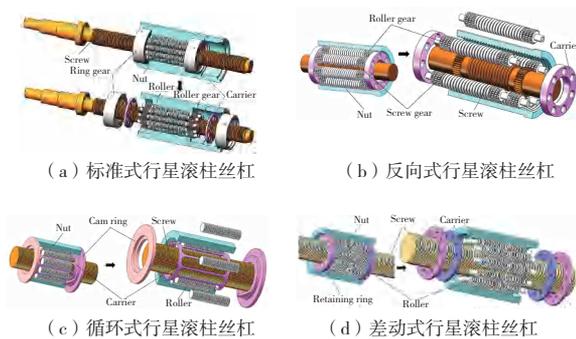


图 1 4 种主要类型行星滚柱丝杠

### 1) 标准式行星滚柱丝杠 (standard PRSM)

标准式由丝杠、滚柱、螺母、保持架和齿圈组成,滚柱绕自身轴线自转并绕丝杠公转,螺母仅保留轴向自由度。其工艺成熟、可靠性高,被广泛用于航空航天伺服机构、注塑设备和钢铁轧机等重载场合。

### 2) 反向式行星滚柱丝杠 (inverted PRSM)

反向式将螺母作为驱动部件,丝杠作为输出部件,结构紧凑、可与电机集成,适合中小负载、小行程和高速进给场景,如机器人关节和精密制造设备,但行程受内螺纹加工限制。

### 3) 循环式行星滚柱丝杠 (recirculating PRSM)

循环式通过凸轮环引导滚柱循环,啮合副数量多、刚度和承载力更强,但高速运行时复位冲击显著,振动与噪声明显,主要用于医疗和印刷设备等对刚性要求较高的场合。

### 4) 差动式行星滚柱丝杠 (differential PRSM)

差动式通过大、小直径段同时啮合实现支撑,结构简化、承载力大,但受制于啮合精度,易磨损、传动比不稳定,适合低速重载、对精度要求不高的工况。

总体而言,标准式因工艺成熟在工业装备中占主导,反向式凭紧凑与动态性能契合机器人和智能制造需求,是研究热点;循环式在高刚性应用中具优势;差动式则局限于低速重载场合。不同构型体现了承载、精度与工艺可行性之间的设计权衡<sup>[4]</sup>。

## 2 行星滚柱丝杠副构型设计研究

当前行星滚柱丝杠研究主要集中在结构设计精度优化、承载能力提升及动态特性改进等方面。在设计方法上,重点涉及参数化建模、系统建模与仿真优化;在工艺环节,则关注制造精度控制、热处理与装配工艺的改进。本节将重点综述行星滚柱丝杠在构型设计方面的研究进展。

行星滚柱丝杠由于其采用多滚柱行星传动结构(图 2),需协调丝杠、螺母、滚柱、齿圈等多部件的啮合关系,而且滚柱与丝杠、螺母的螺旋面接触存在滑动摩擦,尤其是在高速或变载荷工况下,摩擦转矩增大,传动效率进一步降低,且摩擦加剧会导致发热增加,影响长期运行的稳定性<sup>[5]</sup>。为了解决这些问题,许多学者从参数设计、啮合与接触特性、刚度和承载能力等方面开展研究。

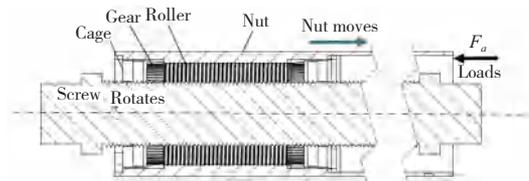


图 2 PRSM 构型图

### 2.1 运动学建模与几何参数优化

行星滚柱丝杠副相比于齿轮等其他传动机构具有高承载、高刚度及高精度等优点,但也由于其多点、多体、多对的啮合特性给其自身的参数匹配设计带来了一定的困难(图 3)。

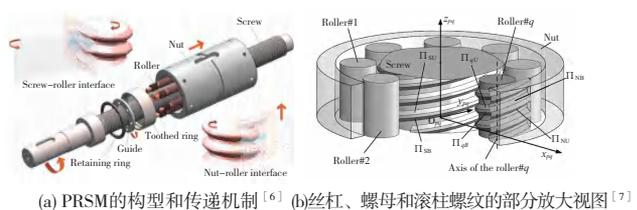


图 3 PRSM 外、内构型及传递机制

1974 年, VINOKUR 等<sup>[8]</sup>首次提出了行星滚柱丝杠的工作原理,阐明了其多点啮合和高承载特性,为后续研究奠定基础。MOROZOV 等<sup>[9]</sup>以

螺纹轮廓为研究对象,分析了螺纹轴角对承载能力的影响,揭示了螺纹几何参数与传动性能的关系。VELINSKY 与 JONES 等<sup>[10-11]</sup>建立了螺纹参数与效率之间的模型,明确了中径、螺旋角等设计变量对传动效率和摩擦损失的作用规律。

在此基础上,HOJJAT 等<sup>[12]</sup>研究了行星滚柱丝杠结构参数与导程之间的联系,以及不同旋向与中径的丝杠、滚柱匹配对机构受力和滑动性能的影响。进一步的研究逐渐考虑制造误差与实际应用条件;ZHANG 等<sup>[13]</sup>建立了考虑螺距偏差的螺纹载荷分布计算模型,分析了螺距偏差对载荷分布的影响及不同加工精度下的载荷分布规律。WEI 等<sup>[14]</sup>则引入乌鸦搜索算法,以丝杠中径、滚柱长度等为变量,优化了承载部件的强度

分布,体现了智能优化方法在参数设计中的应用价值。

在行星滚柱丝杠副的传动中,螺纹导程与中径和螺旋角之间满足以下关系:

$$p = \pi d_m \tan \alpha \quad (1)$$

式中: $p$  为有效导程; $d_m$  为中径; $\alpha$  为等效螺旋角。进一步地,丝杠的轴向位移  $x$  与旋转角  $\theta$  的关系可写作

$$x = \frac{p}{2\pi} \theta \quad (2)$$

式(2)揭示了丝杠旋转运动与螺母轴向位移之间的基本运动学联系,是后续啮合接触、载荷分配及动力学建模的理论基础。PRSM 运动坐标建立方法如图 4 所示。

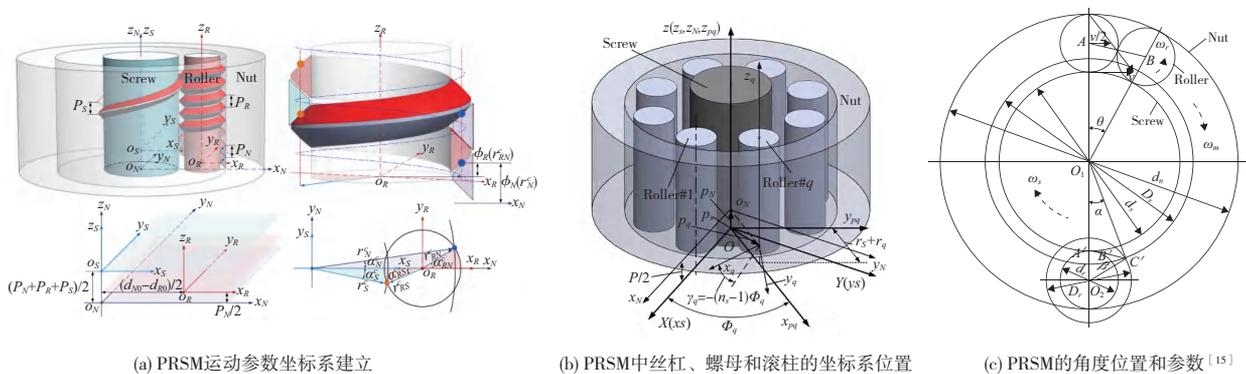


图 4 PRSM 运动坐标建立方法

总体来看,参数设计研究已从早期的几何机制揭示发展为兼顾承载能力、效率与寿命的多目标优化过程。现有成果不仅揭示了螺纹廓形、导程和中径等关键参数对性能的影响,也逐步引入误差建模与智能算法,实现了设计精度与工程适用性的统一,为后续啮合建模和动力学分析提供了坚实的理论与方法基础。

然而,由于行星滚柱丝杠副多体啮合及参数耦合关系复杂,其设计过程仍面临建模精度不足、参数匹配机制不够完善等问题。未来研究需在机制建模与优化算法融合、实验验证与工程应用结合等方面进一步深化,以建立更加系统化、可靠性的参数设计理论与方法。

## 2.2 啮合机制与接触建模

结合 2.1 节所述可知,行星滚柱丝杠副的啮合与接触机制研究是理解其传动特性和优化设计的核心:丝杠、滚柱和螺母各对螺纹副在刚体条件下的接触位置、间隙状态直接影响行星滚柱丝杠

副的承载能力及传动效率。

早期研究主要基于几何建模和曲面共轭条件。XING 等<sup>[16]</sup>结合曲面几何关系与坐标变换提出了接触运动学方法,能够有效描述滚柱与丝杠/螺母间的相对运动,并揭示了滑动速度与螺距不匹配对接触迁移的影响。JONES 等<sup>[17]</sup>引入 FRENET 坐标系,形式化处理螺纹副接触点定位,使复杂三维啮合可在局部框架下简化表示,首次将滚柱迁移视作周期性激励源,为动力学研究奠定了基础(图 5)。

随后研究逐渐考虑螺纹方向与摩擦效应。MA 等<sup>[18]</sup>和 JONES、VELINSKY 分析了丝杠与滚柱螺纹旋向及滚柱运动规律,并引入静接触模型,将几何与受力相耦合,为接触刚度和动力学建模提供输入条件。LIU 等<sup>[19]</sup>则对不同滚柱螺纹形状下的啮合性能进行了对比,提出优化思路以提升传动速度和寿命(图 6、图 7)。

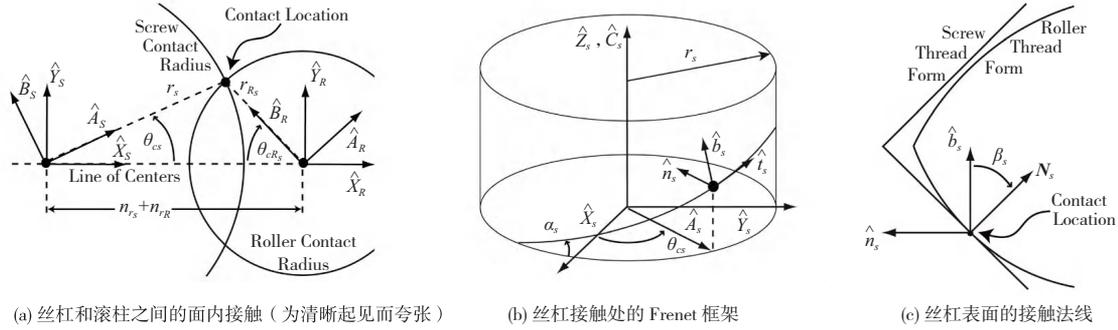


图5 PRSM 中丝杠接触过程的坐标系与接触特征建模

在更复杂的误差条件下, FU<sup>[20]</sup> 基于螺旋曲面啮合原理建立了考虑螺纹牙型误差与分头误差的啮合模型, 揭示了结构参数、间隙向量和制造偏差对啮合性能的影响规律。QIAO 等<sup>[21]</sup> 基于螺旋滚道方程推导接触点主曲率, 提升了 Hertz 接触参数计算精度, 进一步完善了接触特性建模方法。

总体来看, 啮合与接触研究路径从几何建模与接触点定位—滑移机制—误差建模逐步递进, 揭示了几何和摩擦对啮合性能的作用机制, 在建模方法上不断提升, 如引入曲面共轭条件、螺旋坐标系及 Hertz 接触理论, 显著改善了啮合接触行为的描述精度, 也为后续载荷分配、接触刚度乃至动力学响应建模提供了理论支撑。

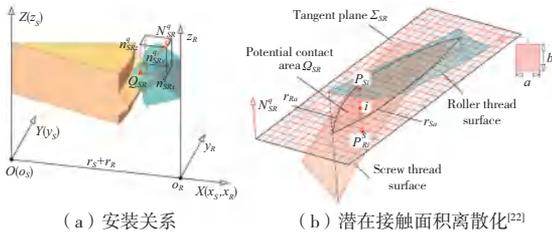


图6 丝杠-滚柱的接触模型

### 2.3 载荷分配与刚度建模

行星滚柱丝杠副的载荷分配与刚度建模直接关系到其承载能力和定位精度, 是保障复杂工况下抵抗变形和冲击, 保持稳定性的关键。

早期研究多从赫兹接触理论出发, 建立静态接触与载荷分布模型。KIM 等<sup>[23]</sup> 对滚珠丝杠副与行星滚柱丝杠副进行对比, 提出了不同载荷下的接触计算公式, 明确了接触应力与轴向刚度的关系。AURÉGAN 等<sup>[24]</sup> 通过滚滑接触实验和有限元分析发现, 丝杠与滚柱啮合处承受最大应力, 并揭示了摩擦引起的接触状态变化。

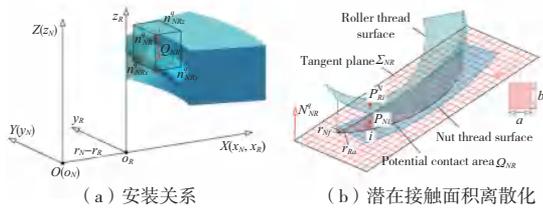


图7 螺母-滚柱的接触模型

在理论建模方面, ABEVI 等<sup>[25]</sup> 将丝杠副各零部件抽象为杆件、梁和非线性弹簧, 提出快速迭代方法求解静态载荷分布与刚度。ZHANG 等<sup>[26]</sup> 在此基础上引入螺距偏差, 指出制造误差会导致载荷再分配和刚度下降 (图 8)。PRECISION 与 YANG 等<sup>[27-28]</sup> 分别针对标准式与差动式建立螺旋副载荷分布迭代计算公式, 并用有限元仿真验证了其正确性。LIU 等<sup>[29]</sup> 则基于 Hertz 理论提出了一种静态接触力分布分析方法, 对接触力分布规律进行了补充。

基于上述研究, 接触点的法向曲率与等效接触半径通常可由下式统一描述:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \delta = \left( \frac{3F_n}{4E^* \sqrt{R_{eq}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  分别为丝杠与滚柱啮合表面的主曲率半径;  $R_{eq}$  为等效曲率半径;  $F_n$  为法向载荷;  $E^*$  为等效弹性模量;  $\delta$  表示赫兹接触形变量。该模型的核心意义在于: 通过曲面共轭条件获得接触点的几何位置与主曲率, 再结合赫兹接触理论得到受力与形变量之间的定量关系, 从而实现了几何设计参数与力学性能之间的直接映射。这为进一步开展载荷分配、接触刚度乃至动力学建模奠定了理论基础。

近年来, 研究开始面向多工况与优化方法。HU 等<sup>[30]</sup> 基于影响系数法提出多目标优化, 在承载能力、载荷均匀性与效率间实现平衡, 并通过加速实验验证优化效果, PRSM 性能测试试验台系统如图 9 所示。ABEVI 等与 FU 等<sup>[31]</sup> 则提出多滚柱静力学模型, 进一步提升了建模效率与适用性。

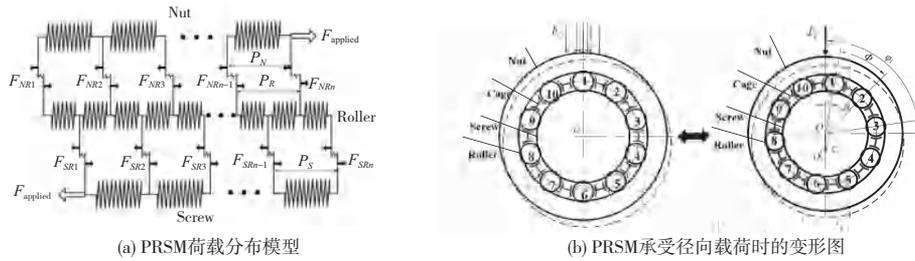


图8 PRSM 载荷分布及受载变形示意图

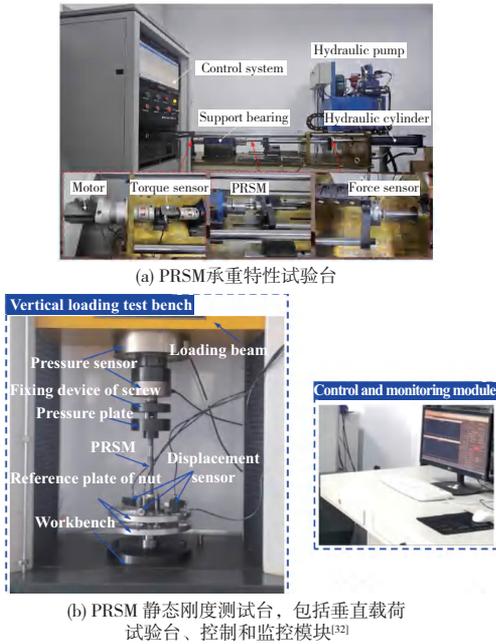


图9 PRSM 性能测试试验台系统(含承重特性与静态刚度测试装置及控制监控模块)

在建模表达上,载荷迭代与轴向刚度常用下式表示:

$$\begin{cases} F_i^{(k+1)} = k_{c,i}(x - \delta_i^{(k)}) \\ K_{ax} = \frac{\partial}{\partial x} \sum_i F_i \approx \sum_i k_{c,i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x$ 表示螺母与丝杠之间的总轴向变形; $F_i$ 为第 $i$ 对接触的载荷份额; $\delta_i$ 为该接触对的局部形变量; $k_{c,i} = \partial F_i / \partial \delta_i$ ,为等效接触刚度( $c$ 为接触刚度); $K_{ax}$ 为整体轴向刚度。通过迭代公式,可以刻画多对接触在受载后的力学响应过程,而通过局部接触刚度的线性叠加则可得全局轴向刚度的近似表达。它为进一步分析误差耦合、热-力作用以及服役条件下的刚度退化提供了可操作的数学基础,同时也为后续动力学建模中的刚度矩阵构造提供了参数输入。

总体来看,载荷与刚度研究已形成“接触理论—数值建模—有限元验证—优化改进”的研究

链条,显著提升了对接触应力分布与刚度机制的认识。研究成果揭示了几何参数、制造误差与摩擦效应对载荷转移与刚度退化的影响,为后续动力学建模和可靠性分析提供了必要输入。

## 2.4 小结

综上,行星滚柱丝杠副在参数设计、啮合接触及刚度承载特性方面已形成较为完整的研究脉络。参数设计逐步深化对几何变量与效率、寿命的关系理解,并引入智能优化算法提升匹配精度;啮合与接触建模由几何共轭拓展至有限元与误差耦合,揭示了多因素对啮合精度和摩擦性能的影响;刚度与承载研究则完善了复杂载荷下应力分布与接触刚度的认识,为高可靠性设计提供支撑。

但现有研究多局限于理想化或静态条件,尚缺乏对多物理场耦合、动态载荷及长期服役退化规律的系统探索;数值建模与实验验证结合不足,对工程复杂边界覆盖不够。未来亟需在多体动力学与多场耦合建模、实验方法及系统优化设计上进一步突破,建立由理论到工程的系统化设计体系,以支撑其在高端装备中的可靠应用。

## 3 行星滚柱丝杠副制造工艺研究

前文围绕行星滚柱丝杠的四大类型与构型设计,从参数设计、啮合与接触特性以及刚度与承载特性3个方面梳理了理论研究成果,为性能提升提供了系统性的设计依据。然而,设计理论若真正实现为高承载、高精度的传动部件,依赖于先进可靠的精密制造工艺,否则可能引发摩擦加剧、精度衰减甚至失效,严重限制高端应用能力。

因此,本章将聚焦于行星滚柱丝杠的制造工艺研究,目前集中在螺纹加工和螺旋面加工两方面,核心在于螺纹与螺旋面的成形精度和装配一致性。

### 3.1 螺纹工艺研究

螺纹作为行星滚柱丝杠的核心要素,其设计与制造直接决定丝杠机构的载荷传递能力、传动精度及寿命。近年来,许多学者针对螺纹的加工工艺

进行了研究,主要分为磨削和车削两种方式(图 10)。

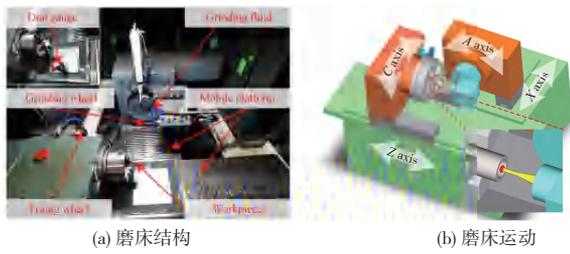
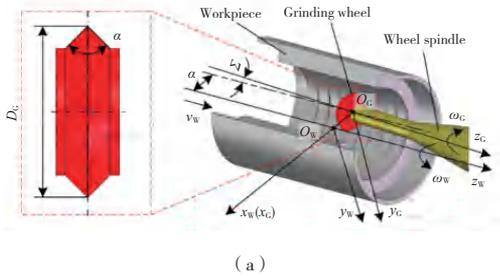
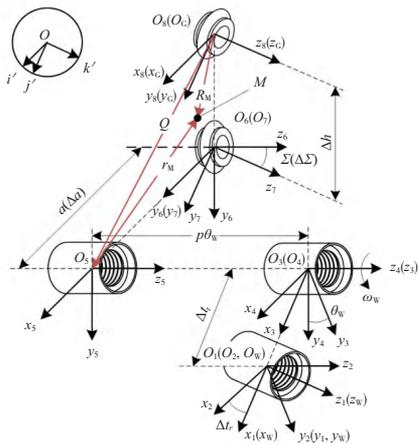


图 10 内螺纹数控磨床<sup>[33]</sup>

螺纹加工方面,研究已形成“磨削为主、车削为辅”的格局。早期,ZHANG 等<sup>[34]</sup>提出螺旋扫描磨削的表面生成机制,揭示了螺旋角对表面粗糙度的改善作用。此后,WANG、FANG 等<sup>[35-36]</sup>建立了内螺纹磨削力与误差模型,指出砂轮修整、安装及工艺参数对精度保持至关重要(图 11)。BLINOV 等<sup>[37]</sup>则提出简化结构的无螺母滚柱丝杠方案,降低了磨削复杂度。近年来,文献[33]针对微小螺距内螺纹的精密磨削进行了系统实验与建模,提出了多误差补偿方法(图 12、图 13)。相比之下,车削工艺更多用于理论建模与参数优化,例如 LU 等<sup>[38]</sup>基于 Euler-Bernoulli 梁理论研究了双主轴车削过程中的动态特性,为工艺建模提供了补充。总体来看,磨削在精度控制与复杂螺纹加工方面占主导,而车削则起到辅助作用。

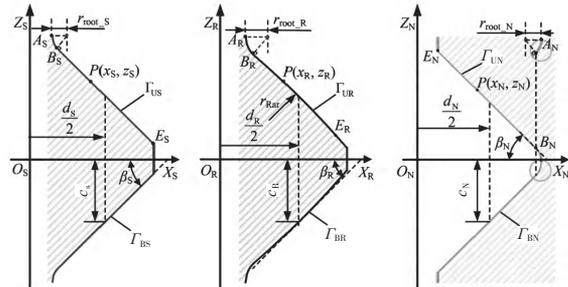


(a)

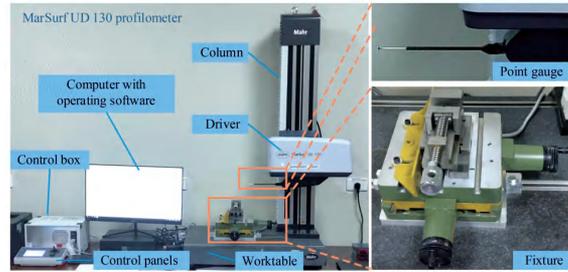


(b)

图 11 多误差 PRSM 内螺纹磨削数学模型



(a) 构件螺纹接触轮廓



(b) MarSurf UD 130 螺纹轮廓扫描仪

图 12 PRSM 螺纹接触轮廓示意与 PRSM 轮廓测量设备<sup>[39]</sup>

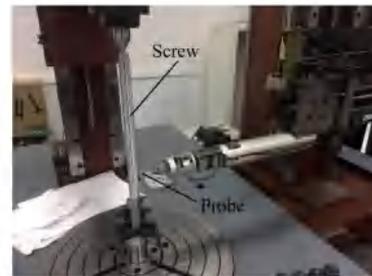


图 13 丝杠螺纹索引误差的测量<sup>[40]</sup>

### 3.2 螺旋面工艺研究

复杂螺旋曲面在行星滚柱丝杠副中应用广泛。螺旋面的加工质量不仅决定了啮合接触面积与载荷分布,还直接影响接触刚度、摩擦特性及疲劳寿命,加工误差会导致啮合状态改变,进而引发偏载、效率下降甚至早期失效。其中,螺旋线误差、齿形误差、表面粗糙度、同轴度与圆柱度是最关键的工艺控制指标。

因此,螺旋面制造工艺研究的重点在于如何通过高精度磨削、铣削及误差补偿技术,实现对上述关键参数的有效控制,从而保障丝杠副在高载荷和高精度工况下的稳定运行。

螺旋面加工方面,研究聚焦于齿轮、滚柱和丝杠三类部件的精度控制。齿轮加工方面,RONG 等<sup>[41]</sup>提出离散化效应的螺旋锥齿轮磨削粗糙度与数字孪生建模方法,实现了齿面过切控制与优

化。滚柱加工方面,文献[34]建立了螺旋扫描磨削的表面粗糙度预测模型,发现螺旋扫描磨削通过增大螺旋角可有效降低表面粗糙度;TANG等<sup>[42]</sup>研究了滚柱加工中的几何误差补偿方法,提出非旋转刀具的补偿策略。丝杠加工方面,LIU等<sup>[43]</sup>与OU等<sup>[44]</sup>则分别利用红外成像技术与磨床成形原理,探讨了丝杠铣削的切削温度与磨床几何误差补偿,为工艺稳定性提供了参考(图14)。加工误差测量试验台如图15所示。

总体而言,螺旋面加工的重点在于通过参数建模与误差补偿技术控制几何偏差和表面质量,以确保啮合精度和寿命。

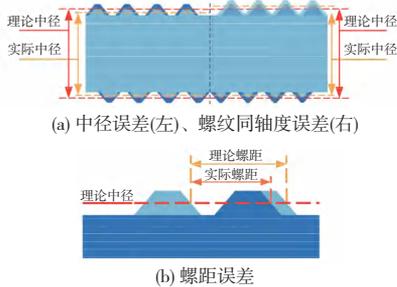


图14 加工制造误差示意<sup>[45]</sup>

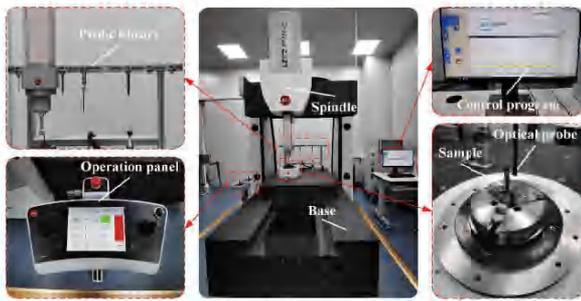


图15 加工误差测量试验(超高精度坐标测量机)<sup>[46]</sup>

### 3.3 小结

总体来看,制造工艺研究已形成从螺纹磨削、螺旋面磨削的几何精度、表面质量改善到误差建模及补偿、参数优化的多层次体系,为复杂啮合关系的稳定性提供了工艺保障。

然而,现有成果多集中于单工序和理想化实验,对多工序耦合、热-力影响及长期服役下的精度保持关注不足,同时实验验证与理论建模的结合深度仍不够。未来研究应加强多物理场耦合建模、工艺全过程数字孪生与在线监测控制的结合,推动制造工艺向智能化、自适应和系统化方向发展,从而为行星滚柱丝杠在高端复杂工况下的可靠应用提供更加坚实的工艺支撑。

## 4 行星滚柱丝杠副动力学行为与噪声机制研究

行星滚柱丝杠副在高载荷、高速及复杂工况下运行时,除了承受静态的啮合力和接触应力外,还不可避免地受到多种动态激励的影响。动力学与噪声问题已逐渐成为该机构在高端装备中推广应用的重要瓶颈。

第3章中已较为系统地介绍了行星滚柱丝杠副的接触建模、载荷分配规律及接触刚度特性,这些研究不仅揭示了静态条件下的受力与变形规律,也为动力学建模提供了关键输入。具体而言,静态接触模型可为动力学方程提供初始刚度矩阵和载荷分布边界条件,而误差与摩擦特性则进一步转化为动力学激励源。因此,本章不再赘述静态建模过程,而在其基础上重点综述行星滚柱丝杠副在振动与噪声方面的研究进展。

### 4.1 多源动力学激励与建模

动力学激励源主要包括几何误差、摩擦滑移、热-力耦合及滚柱迁移等。导程与螺距误差会引起周期性载荷波动,摩擦效应导致力矩随速度和载荷波动,摩擦发热又改变接触刚度并激发低频振动,而滚柱迁移则引起高频冲击。上述激励源常以耦合形式作用,使问题呈现非线性与多频带特征(图16)。

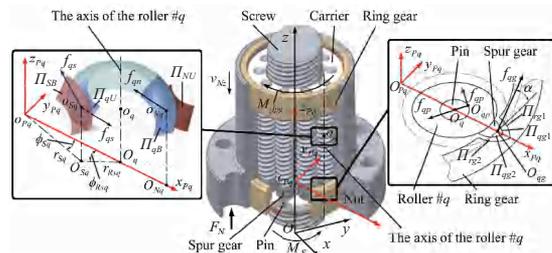


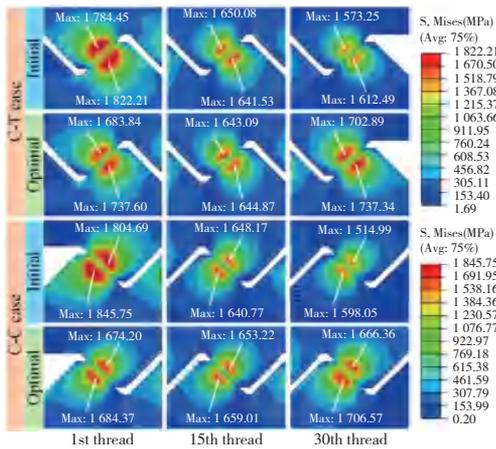
图16 PRSM的多体力学分析

#### 1) 静态接触特性到动态激励

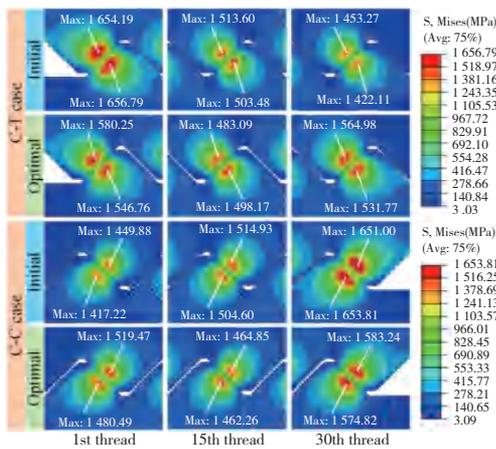
在建模方法上,学者们逐渐建立起了从简化模型到复杂多体动力学的研究路径。基于第3章所述,文献[17]基于螺旋曲线与Frenet坐标系提出接触运动学方法,使复杂三维啮合可在局部曲率框架下解析,并首次系统刻画了滚柱迁移引发周期性激励对接触点时变性的影响。该模型为后续将迁移视作周期性激励源奠定了基础。

进一步的接触/承载研究在此框架上细化了几何与受力输入,如文献[23]结合赫兹接触理论进行数值建模,分析了不同载荷水平下的接触特



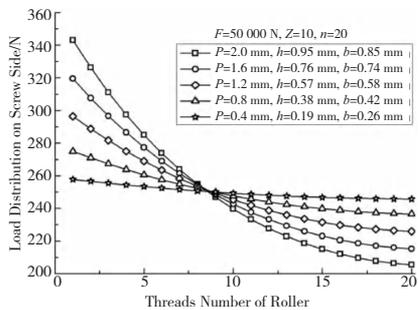


(a) 丝杠-滚柱接触面

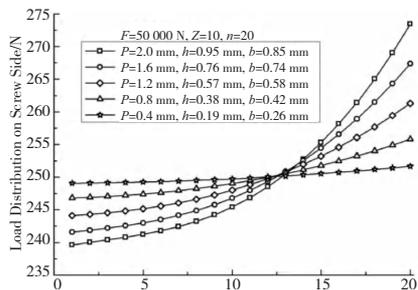


(b) 螺母-滚柱接触面

图 19 PRSM 接触对初始和载荷分布优化后的 Von Mises 应力比较



(a) 螺杆侧的载荷分布



(b) 螺母侧的载荷分布

图 20 螺线形状对载荷分布的影响

### 4.3 小结

总体而言,国内外在动力学研究上各有侧重:国际上更注重运动学机制与建模体系(JONES、VELINSKY、AURÉGAN 等),国内则在摩擦特性、热效应与工艺控制方面积累了大量成果。现有研究已建立了从激励源识别到建模分析再到控制策略的完整框架。但多数集中于理想化或单因素条件。未来需加强多物理场耦合建模与实验台架验证,推动动力学与可靠性设计的结合,以支撑 PRSM 应用在高端装备中的低噪声与高稳定性。

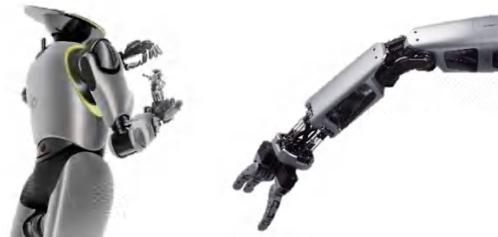
## 5 行星滚柱丝杠副工程应用研究

前文围绕行星滚柱丝杠副的设计、工艺与静、动态特性进行了系统综述,为其高精度与高可靠性应用奠定了基础。随着高端装备与智能制造的发展,行星滚柱丝杠副凭借高承载、长寿命、传动精度高与结构紧凑的优势,正逐步走向工程化应用。当前,三类典型场景尤为突出:机器人关节、航空航天伺服作动器以及医疗设备与康复外骨骼。本文将围绕这 3 方面分析其应用价值与发展潜力。

### 5.1 机器人关节应用

近年来,随着人形机器人、协作机器人及手术机器人的快速发展,关节传动系统需要在有限空间内兼具高承载、高精度、轻量化和长寿命。传统滚珠丝杠或齿轮传动在这些方面存在局限,难以兼顾大载荷与紧凑结构。行星滚柱丝杠副凭借多点啮合实现高载荷分担,在有限空间内可输出大转矩,且回程间隙小,有利于轨迹精度与动态响应,尤其适合人形机器人、协作机器人及手术机器人等(图 21)。

当前挑战主要在于轻量化与高承载的矛盾、复杂工况下摩擦与热稳定性不足以及制造成本偏高。未来若能在结构优化、工艺降本与动态适应性方面突破,将推动其在机器人关节中的规模化应用。



(a) PRSM应用于人形机器人线性关节系统

(b) PRSM应用于灵巧手的高精度控制

图 21 PRSM 应用在机器人中的高精度运动控制

## 5.2 航空航天伺服作动器应用

伺服作动器是航空航天装备中关键的执行机构,广泛应用于飞行控制面驱动、航天器姿态调节以及火箭发动机阀门控制等环节。航空航天作动器需在高载荷、冲击和极端环境下保持稳定与可靠。而传统液压系统驱动力高,但结构复杂、维护成本高、能效低,滚珠丝杠的承载能力及寿命不足,均愈发难以完全满足现代航天航空作动系统的需求。行星滚柱丝杠副凭借有限体积内即可实现高承载、高效率和良好的精度保持性,已在部分飞控执行系统中展现优势(图 22)。然而其限制因素在于制造与装配精度要求极高、工艺复杂、成本高昂,以及在极端温度和振动环境下的润滑与可靠性尚待验证。未来研究应聚焦轻量化设计、冗余容错和多物理场环境下的可靠性建模与实验,以支撑其在航空航天领域的推广。



图 22 PRSM 在航空航天伺服作动器中的应用

## 5.3 医疗设备与康复外骨骼应用

高端医疗系统对低噪声、精准定位和长期可靠性要求严苛。例如,医学影像设备和手术机器人要求传动系统能够在微米级精度下保持平稳运动;康复外骨骼辅助系统则需要在轻量化设计下实现高载荷输出,以保证舒适性和安全性。传统齿轮和滚珠丝杠在精度保持、振动控制和长期服役寿命方面存在一定局限,难以完全满足这些特殊需求。而行星滚柱丝杠副能在手术机器人中实现高分辨率线性驱动,在影像设备中提升传动稳定性,在康复外骨骼系统中则可在有限体积与质量条件下兼顾紧凑与大载荷支撑、柔顺控制,展现良好应用前景(图 23)。然而,其实际推广仍受限于高成本、轻量化与医疗安静舒适性要求,且可穿戴装置还要求更强的轻量化与小型化能力,而这与高承载设计存在一定矛盾。未来在减摩降噪、小型化和智能控制结合方面的突破,将进一步拓展其在医疗与康复领域的应用潜力。



图 23 PRSM 在医疗设备与康复外骨骼中的应用

## 6 总结与展望

本文对行星滚柱丝杠副的研究现状进行了系统综述,围绕其结构构型与运动学建模、啮合接触与静力学特性、动力学行为与噪声机制、制造工艺流程以及工程应用前景等方面展开了全面分析。研究已逐步形成从参数设计、载荷与刚度分析到动态建模和工艺实现的完整技术链条,为高端装备高承载与高精度传动的工程化应用奠定了基础。

具体而言,运动学与静力学研究揭示和奠定了啮合规律、载荷分配和刚度机制的理论基础;动力学与噪声研究进一步揭示了几何误差、摩擦滑移与热效应的耦合作用,逐步建立了从静态接触模型到多体动力学建模的多层级分析体系;制造工艺方面,螺纹与螺旋面磨削已成为满足精度要求的核心路径,车削则在机制建模与工艺调控层面发挥辅助作用;在应用层面,行星滚柱丝杠副已在机器人、航空航天及医疗康复等领域展现出显著潜力。

总的来说,行星滚柱丝杠副的优势在于多点啮合带来的高承载、长寿命与高精度。然而,现阶段仍存在复杂工况下适应性不足、多物理场耦合建模与实验验证不完善、成本控制亟待突破等问题。未来需要进一步融合多物理场机制建模、智能制造技术与可靠性工程方法,以推动行星滚柱丝杠副在高端装备中的长期稳定应用与规模化推广。

尽管行星滚柱丝杠副在设计理论、性能优化与制造工艺方面取得了显著进展,但要实现其在高端装备中的广泛应用仍面临挑战。未来研究可从以下几方面推进:

1) 在理论建模层面,应突破静态或单因素分析的局限,发展涵盖力-摩擦-声-热-疲劳等多物理场的综合模型,以更准确揭示复杂工况下的传动机制;2) 在制造工艺方面,需降低对高端设备的依赖,将数字孪生、自适应控制和在线监测引入螺

纹与螺旋面加工全过程,以提升精度一致性与成本可控性;3)在应用拓展方面,应加强机器人、航空航天和医疗设备中的长期可靠性验证,结合轻量化和容错设计,确保在极端环境与长期服役下的稳定性能;4)人工智能优化算法、先进材料和可靠性工程方法的融合,将为状态监测、寿命预测与风险评估提供新的路径。

综上所述,未来行星滚柱丝杠副的研究应当在理论-工艺-应用三个层面协同推进,以高端装备需求为导向,推动其从实验室研究逐步走向工程应用与产业化。

### 参考文献:

- [1] DONG X L, ZHU H Y, LIU Q Y, et al. Design of downhole robot actuator system and mechanical behavior analyses of the PRSM by considering elastic errors and radial loads[J]. Processes, 2022, 10(8):1520.
- [2] DU X, CHEN B K, ZHENG Z D. Investigation on mechanical behavior of planetary roller screw mechanism with the effects of external loads and machining errors [J]. Tribology International, 2021, 154:106689.
- [3] WU L P, MA S J, FU X J, et al. A review of planetary roller screw mechanism for development and new trends[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(21):10822-10840.
- [4] SANDU S, BIBOULET N, NELIAS D, et al. An efficient method for analyzing the roller screw thread geometry[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126:243-264.
- [5] MA S J, WU L P, FU X J, 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.
- [6] YAO Q, ZHANG M C, MA S J, et al. Study on multi-level progressive optimization of planetary roller screw mechanism [J]. Tribology International, 2023, 189:109008.
- [7] FU X J, LIU G, MA S J, et al. A comprehensive contact analysis of planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139:012302.
- [8] VINOKUR Y N, GEL' MAN V E, SAVCHENKO A P, et al. Roller-helical transmissions a review of foreign patents [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1973, 9(5):471-475.
- [9] MOROZOV V V, ZHDANOV A V. Influence of the axial angle of screw profiles on the load capacity of roller-screw mechanisms[J]. Russian Engineering Research, 2015, 35(7):477-480.
- [10] VELINSKY S A, CHU B, LASKY T A. Kinematics and efficiency analysis of the planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131:011016.
- [11] 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.
- [12] HOJJAT Y, MAHDI AGHELI M. A comprehensive study on capabilities and limitations of roller-screw with emphasis on slip tendency [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(10):1887-1899.
- [13] ZHANG W J, LIU G, MA S J, et al. Load distribution over threads of planetary roller screw mechanism with pitch deviation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(13):4653-4666.
- [14] WEI C A I, GENG L I U, SHANG-JUN M A, et al. Optimization research of planetary roller screw mechanism parameters based on crow search algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(6):1013-1022.
- [15] MA S J, LIU G, TONG R T, et al. A new study on the parameter relationships of planetary roller screws [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012:340437.
- [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] JONES M H, VELINSKY S A. Contact kinematics in the roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(5):051003.
- [18] MA S J, ZHANG T, LIU G, et al. Kinematics of planetary roller screw mechanism considering helical directions of screw and roller threads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015:459462.
- [19] LIU Y Q, SHANG Y, WANG J S. Mathematical analysis of the meshing performance of planetary roller screws applying different roller thread shapes[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5):168781401770300.
- [20] FU X J. Studies on meshing mechanism of helical surfaces in planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3):26.
- [21] QIAO G, LIU G, MA S J. Principal curvature calculation and contact characteristics analysis of the planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21):140.
- [22] HU R, WEI P T, DU X S, et al. Investigation of loaded contact characteristics of planetary roller screw mechanism based on influence coefficient method and machine learning [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 58:102146.
- [23] KIM N S, KIM K, JONG S. Contact analysis and static

- load carrying capacity of planetary roller screw mechanism[EB/OL]. In Review, (2020-05-17) [2025-09-15]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-106438/v1>.
- [24] AURÉGAN G, FRIDRICI V, KAPSA P, et al. Experimental simulation of rolling-sliding contact for application to planetary roller screw mechanism [J]. *Wear*, 2015, 332: 1176-1184.
- [25] ABEVI F, DAIDIE A, CHAUSSUMIER M, et al. Static load distribution and axial stiffness in a planetary roller screw mechanism [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138: 012301.
- [26] ZHANG W J, LIU G, TONG R T, et al. Load distribution of planetary roller screw mechanism and its improvement approach [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(18): 3304-3318.
- [27] PRECISION B. Calculation of load distribution of planetary roller screws and static rigidity [J]. 2011, 39(4): 1-4.
- [28] YANG C, JI J G, TONG X C, et al. Load distribution and verification of differential planetary roller screw [J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(9): 88-94.
- [29] LIU J, PENG H, LUO Y, et al. Research on contact model of planetary roller screw drive pair based on hertz contact theory [J]. *Nuclear power engineering*, 2020, 41(1): 185-188.
- [30] HU R, WEI P T, DU X S, et al. Multi-objective optimization and accelerated experimental research on load distribution of planetary roller screw mechanism [J]. *Tribology International*, 2024, 199: 110046.
- [31] 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.
- [32] XING M C, LIU S, CHENG Z W, et al. Multi-rollers statics analysis of planetary roller screw mechanism based on explicit expression [J]. *Tribology International*, 2024, 197: 109818.
- [33] XU H W, WEI P T, DU X S, et al. A study of precision grinding of micro-pitch internal thread for planetary roller screw mechanism [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 106: 35-50.
- [34] ZHANG B, UEMATSU T. Surface generation mechanism in helical scan grinding: an analytical study [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 91 (1/2/3): 206-214.
- [35] WANG Y Z, CHEN Y Y, ZHOU G M, et al. Roughness model for tooth surfaces of spiral bevel gears under grinding [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 104: 17-30.
- [36] FANG C, YANG C B, CAI L G, et al. Predictive modeling of grinding force in the inner thread grinding considering the effect of grains overlapping [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(1): 943-956.
- [37] BLINOV D S, MOROZOV M I. Development and studies of new rolling screw-type mechanisms [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 996(1): 012006.
- [38] LU K B, JING M Q, LIU H, et al. Dynamic analysis of slender shaft in twin-spindle turning [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 48/49: 448-454.
- [39] 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.
- [40] FU X J, LI X, MA S J, et al. A multi-roller static model of the planetary roller screw mechanism considering load sharing [J]. *Tribology International*, 2022, 173: 107648.
- [41] RONG K B, DING H, KONG X N, et al. Digital twin modeling for loaded contact pattern-based grinding of spiral bevel gears [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 49: 101305.
- [42] TANG Z W, ZHOU Y S, WANG S H, et al. An innovative geometric error compensation of the multi-axis CNC machine tools with non-rotary cutters to the accurate worm grinding of spur face gears [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 169: 104664.
- [43] LIU C, HE Y, WANG Y L, et al. Effects of process parameters on cutting temperature in dry machining of ball screw [J]. *ISA Transactions*, 2020, 101: 493-502.
- [44] OU Y, XING Y S, WANG K, et al. Investigation of crucial geometric errors of screw grinder for ball screw profile parameters [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(1): 533-550.
- [45] WU H L, WEI P T, CAI L, et al. Optimization of planetary roller screw tolerance matching based on machining error sensitivity analysis and fuzzy analytic hierarchy processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(22): 2693-2703.
- [46] 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.
- [47] 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.