

行星滚柱丝杠副热特性研究现状

乔冠^{1,2} 陈佳琪¹ 唐术锋^{1,2*} 刘国强³ 刘更⁴

1. 内蒙古工业大学机械工程学院, 呼和浩特, 010051
2. 内蒙古自治区机器人与智能装备技术重点实验室, 呼和浩特, 010051
3. 特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室, 包头, 014030
4. 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:行星滚柱丝杠副在长时间高速重载的工况下会堆积大量热量,使系统内部温度升高,产生热变形,导致其润滑性能变差甚至机构失效。通过行星滚柱丝杠副的结构特点揭示其热特性机理,从热源分析、热特性分析方法、温升与热力耦合、热变形、热误差及其优化等方面分析总结其热特性研究进展。在此基础上,探讨并展望了行星滚柱丝杠副热特性的研究趋势。

关键词:热特性;温升;热力耦合;热误差;行星滚柱丝杠副

中图分类号:TH132.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Review of Thermal Characteristics for Planetary Roller Screw Mechanisms

QIAO Guan^{1,2} CHEN Jiaqi¹ TANG Shufeng^{1,2*} LIU Guoqiang³ LIU Geng⁴

1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051,
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment Technology, Hohhot, 010051,
3. National Key Laboratory of Special Vehicle Design and Manufacturing Integration Technology, Baotou, Inner Mongolia, 014030
4. Shaanxi Engineering Laboratory for Transmissions and Controls, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

Abstract: In a long period of high-speed and heavy-load conditions, the planetary roller screw mechanisms accumulated much heat. Thus, the rise of internal temperature of the system, and thermal deformations led to the lubrication performance degeneration, even the failure of the mechanisms. According to the structural characteristics of the planetary roller screw mechanisms, the mechanism of its thermal characteristics was revealed. And, the progresses of thermal characteristics research were analyzed and summarized from the aspects of heat source, thermal characteristics analysis methods, temperature rise and thermo-mechanics coupling, thermal deformations, thermal errors and the structural. Then, the research trends in thermal characteristics of the planetary roller screw mechanisms were discussed and predicted.

Key words: thermal characteristic; temperature rise; thermo-mechanics coupling; thermal error; planetary roller screw mechanism

0 引言

行星滚柱丝杠副(planetary roller screw mechanism, PRSM)是一种通过螺纹啮合和齿轮啮合将直线运动转化为旋转运动的高精度机械传动装置^[1-2]。PRSM和滚珠丝杠副(ball screw

mechanism, BSM)作为机电作动器(electro-mechanical actuator, EMA)的执行机构,在提高航空航天领域飞控作动系统、人形机器人一体化关节以及精密机床进给系统的传动精度和维护方面发挥着关键作用^[3-5]。PRSM工作过程中,滚滑摩擦和外界环境等因素导致内部温度分布不均,产生的热变形、磨损和热误差等一系列问题不仅会影响PRSM的传动效率,还会使其精度下降、使用寿命缩短,甚至导致机构失效。因此,归纳总结PRSM热特性研究的现有成果,可为有效控制和消除上述问题、保障PRSM长期稳定运行提供参考。

收稿日期:2024-10-28 修回日期:2025-11-18

基金项目:国家自然科学基金(52265009);中国博士后科学基金(2024M762956);内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS05009);中央引导地方科技发展计划(2025ZY0012);内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持项目”(NJYT24028);内蒙古自治区“英才兴蒙”工程团队项目(2025TEL02);特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室开放课题(GZ2025KF011)

目前,对 PRSM 的研究集中在螺纹啮合原理^[6-7]、结构参数设计与优化^[8-10]、运动学^[11-13]、接触特性^[14-17]、摩擦力矩^[18-19]、传动效率^[20-21]、动态特性^[22-23]、螺纹牙载荷分布^[24-25]等方面,对 PRSM 热特性的研究较少。杨家军等^[26]使用 ANSYS 分析了 PRSM 在不同转速、不同冷却液流量下的温度变化,得到了中空 PRSM 的温升曲线,并讨论了 PRSM 的热变形抑制方法。刘淑敏等^[27]建立了 4 种安装方式下的 PRSM 载荷分布有限元模型,研究了不同工作温度对 PRSM 载荷分布的影响规律,发现温度对丝杠侧载荷分布的影响始终大于螺母侧。施建华^[28]针对不同工况研究了 PRSM 热特性和热变形,探讨了热变形抑制方法,提出了发尘寿命指标,并设计了发尘量检测试验台。MA 等^[29]建立了轴承摩擦力矩模型以及考虑材料弹性滞后、滚柱自旋滑移、润滑油黏性、螺纹滚道差动滑动的 PRSM 摩擦力矩模型,探讨了摩擦热与 PRSM 工况、螺纹接触角和螺旋升角之间的关系。MIAO 等^[30]提出一种基于摩擦力矩的 PRSM 摩擦热计算方法,建立了瞬态热模型,分析了 PRSM 在多种热工况下的传热,并研究了温度分布对螺纹表面间隙和接触位置的影响,发现 PRSM 的承载能力受其部件间温差的影响较大。

许多学者在 BSM 温度分布及热特性领域,如温升与热力耦合^[31-33]、热源^[34-35]、热误差与误差补偿^[36-40]、热变形^[41-42]等取得了一系列研究成果,为 PRSM 的热特性分析提供了理论参考。

本文阐述了 PRSM 的结构组成和热特性机理,从热源分析、热特性分析方法、温升与热力耦合、热变形、热误差及其优化方法等五个方面介绍了 PRSM 热特性的研究现状,展望了 PRSM 热特性研究的发展方向。

1 PRSM 的结构组成和热特性机理

1.1 PRSM 的结构组成

根据结构组成和零件相对运动关系,PRSM 的结构形式主要分为标准式、循环式、反向式、差动式和轴承环式^[43]。如图 1 所示,PRSM(通常指标准式 PRSM)主要由丝杠、滚柱、螺母和保持架等组成。通常情况下,丝杠仅绕其轴线转动且有多头螺纹。滚柱是具有螺旋升角的单头螺纹,滚柱螺纹的牙型轮廓通常为弧形,以减小摩擦、提高承载能力。滚柱两端加工有与内齿圈啮合的螺纹齿,以消除丝杠螺旋升角对滚柱产生的倾斜力,保

证滚柱轴线与丝杠轴线平行。螺母具有多头螺纹,且仅做直线运动。保持架保证滚柱沿圆周均匀分布,防止滚柱相互接触,引发干涉。

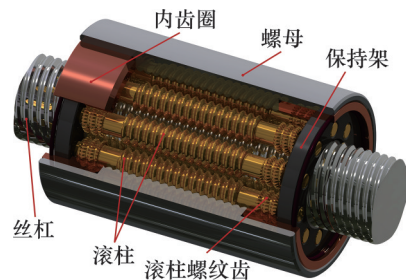


图 1 PRSM 结构示意图

Fig.1 PRSM structure diagram

1.2 PRSM 的热特性机理

长时间高速重载工况下,PRSM 产生的热量主要来自系统内部摩擦和外界环境,产生的热量一部分通过 PRSM 部件表面扩散到空气中,另一部分堆积在系统内部,引起 PRSM 内部温度上升。如图 2 所示,热量使零件发生热膨胀,导致机构热变形,产生热误差,降低机构的定位与传动精度;热量还降低润滑性能与运动可靠性,产生磨损。因此,针对 PRSM 的热源及热特性分析、温升与热力耦合分析、热变形与热误差分析及优化方法的研究,具有重要的理论和实践意义。

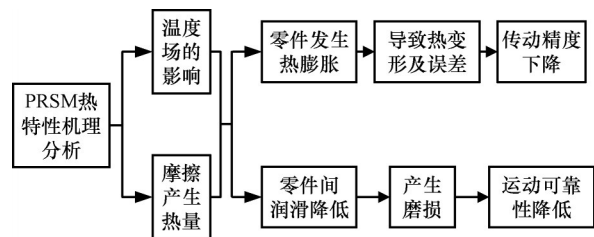


图 2 PRSM 热特性机理

Fig.2 PRSM thermal characterization mechanism

2 温度特性分析

2.1 热源分析

BSM 和 PRSM 的传动系统中,PRSM 内的零件表面温差非常小,且材料表面的发射率偏低,因此研究热特性时通常忽略热辐射对温度的影响,则热传递的主要方式为传导与对流。PRSM 通常将伺服电机作为动力源,转子表面磁密的分布不均会导致转子铁心和推力盘产生涡流损耗。为保证转子的平稳运行,轴承线圈须通入电流,产生铜耗。气隙磁场的交变使电机定子铁心产生磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗,电流中的谐波分量会在电机转子护套及永磁体中产生涡流损耗。转子的高速旋转使转子表面出现空气摩擦损耗。电机内部损耗和 PRSM 零件之间的摩擦会产生大量的热。

这些热量在传动系统内部传导,使相连的 PRSM 温度不断升高,引发热漂移,改变 PRSM 的几何尺寸和位置精度,导致额外误差。误差累积会降低系统的传动精度,影响整体性能和操作可靠性。因此,针对 PRSM 强化热管理、减小热漂移和误差,对确保 PRSM 在高转速和高负载条件下的稳定性和精度至关重要。

如图 3 所示,PRSM 产生的热量主要为丝杠-滚柱接触侧、螺母-滚柱接触侧的啮合螺纹牙之间的摩擦生热,滚柱端部轴颈与保持架之间的纯滚动摩擦产热,PRSM 支撑轴承滚动体和内外圈及保持架的摩擦产热,这些热量经丝杠支撑传至丝杠。PRSM 持续高负载运转过程中,部件表面与周围空气之间的对流换热显著增强。丝杠的旋转导致周围空气流动,因此丝杠和螺母的表面与空气接触时产生对流换热,使丝杠与周围空气、螺母与周围空气、保持架与周围空气产生强制对流换热。与此同时,轴承座壳体表面的热交换主要为自然对流。

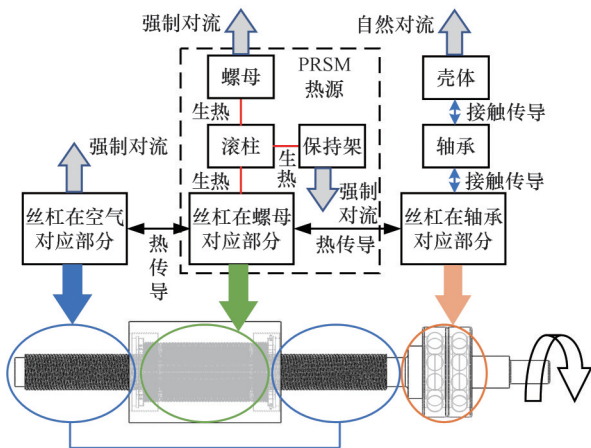


图 3 PRSM 的传热示意图

Fig.3 Heat transfer diagram of PRSM

2.2 热特性分析方法

目前,对 PRSM 热特性的研究主要基于传热学理论,采用数值模拟和实验相结合的方法分析传热过程和温度场。

2.2.1 数值模拟法

PRSM 结构复杂、特征多,利用有限元法分析其热特性时需简化模型,去除未啮合螺纹牙的倒角等细小特征。丝杠和螺母都是近似轴对称的结构,且通常假设每个滚柱承受的轴向负载相等,故选取 PRSM 模型的 $1/N$ 进行分析,其中, N 为滚柱个数,如图 4 所示^[44-45]。计算 PRSM 的摩擦力矩,推导温度边界条件,并计算热通量、热流密度、热传导率等参数,如图 5a 所示^[44]。将简化模型导入

有限元分析软件,设定零件的材料参数,选择合适的网格大小进行网格划分,细化接触处的网格,如图 5b 所示^[46],设定载荷边界条件,进行稳态热、瞬态热、热力耦合分析。

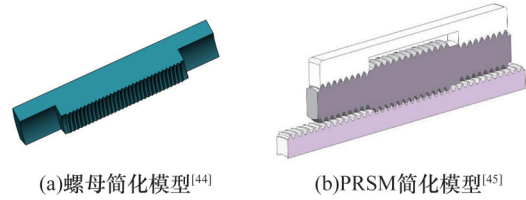
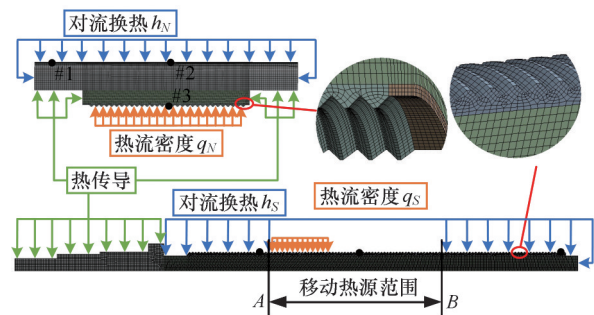
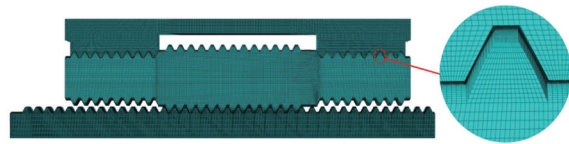


图 4 有限元分析简化模型

Fig.4 Simplified model of finite element analysis



(a) 网格划分与温度边界条件^[44]



(b) 网格细化^[46]

图 5 网格划分及边界条件

Fig.5 Mesh division and boundary conditions

乔冠^[44]在获得热边界条件后建立了包含螺纹牙真实结构的 PRSM 热力耦合三维有限元模型,该模型考虑了丝杠移动热源的影响,能准确模拟丝杠与螺母的瞬态温度分布和热变形,可更精确地预测丝杠和螺母在工作中的温度变化和热变形,为优化设计和提升系统性能提供理论依据与参考。DU 等^[47]基于有限元方法进行了 PRSM 的瞬态热分析,得到任意时刻的温度场和 PRSM 不同位置的温升曲线,实验数据和计算值之间的相关性证实了所提热模型用于瞬态热分析的有效性。李巧等^[48]采用热力耦合仿真方法建立了循环式 PRSM 的有限元模型,研究了不同轴向载荷、工作温度和热力耦合下,丝杠的变形和接触应力与轴向载荷和工作温度的关系。许鹿辉等^[49]使用 ABAQUS 软件和流固耦合方法,采用耦合拉格朗日-欧拉算法,研究了不同转速和轴向载荷下 BSM 的润滑脂流动与接触滚道的应力分布,发现考虑润滑比不考虑润滑脂的接触应力小 18%。李雪晓等^[50]建立了实心/空心滚珠丝

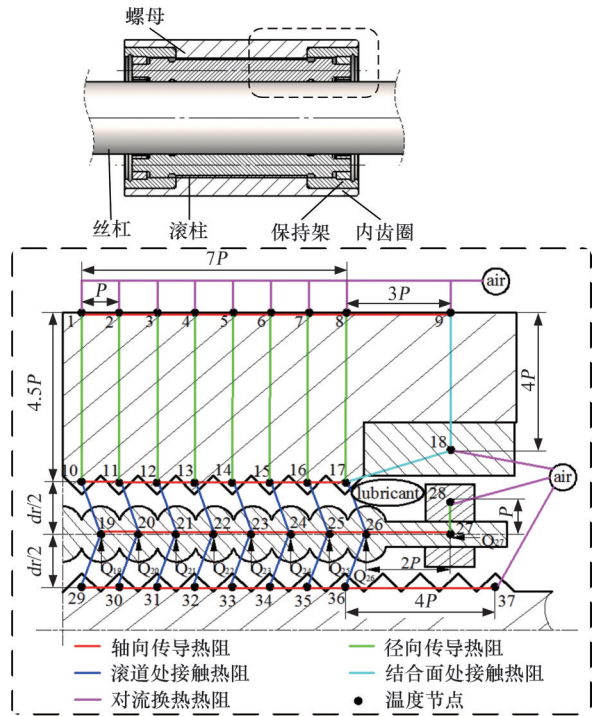
杠系统的热稳态仿真分析模型,利用有限元法得到滚珠丝杠系统的热稳态温度场,并通过多场耦合分析研究了滚珠丝杠系统的热变形对系统性能的影响。

采用有限元法对 PRSM 进行热分析时,通常假设各个滚柱所受轴向力相同,以简化 PRSM 有限元模型。实际工况中,各个滚柱受力并不相同,因此轴向力相同假设会引入模型简化误差。与 BSM 相比,考虑润滑方式建立流-固耦合模型进行 PRSM 热分析的研究较少,而实际工程应用表明,润滑方式对 PRSM 内部温度分布具有显著影响。

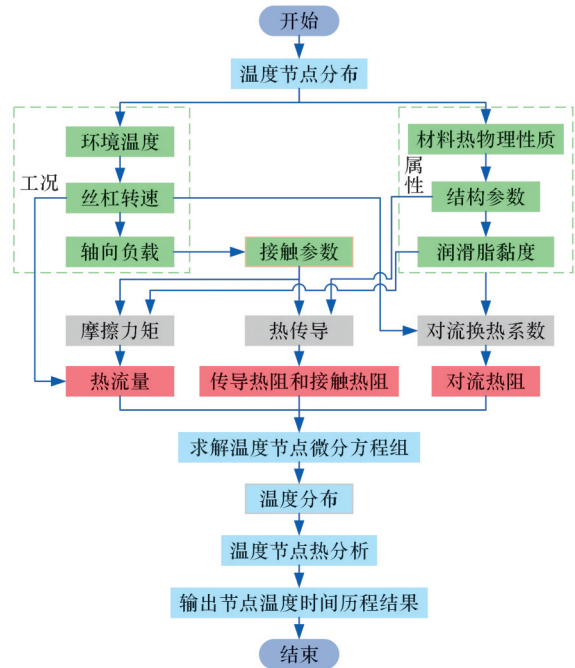
有限差分法因求解偏微分方程的高效性和准确性而广泛用于流体力学、热力学和电磁场的模拟研究。有限差分法中的热网络可用于求解 PRSM 系统的稳态和瞬态温度场^[44]。如图 6 所示,首先划分 PRSM 系统的温度节点,使节点至少覆盖螺纹牙的接触位置,然后通过不同形式的热阻相互连接构建热网络,最后求解热系统的热平衡方程组,获得整个系统的温度场。

QIAO 等^[51]基于热网络法建立了 PRSM 的热模型来预测 PRSM 温度变化,考虑润滑油黏度下降和生热量变化的影响求解热平衡方程组,发现外部载荷、运行速度和润滑剂稠度对温升水平有显著影响。GU 等^[52]采用分块热网络法研究了不同环境温度下差动式 PRSM 的温升变化,并计算了其热变形,建立了考虑热变形的差动式 PRSM 载荷分布模型,提出了结合表面粗糙度的磨损预测方法。MIAO 等^[45]在考虑轴向热误差的基础上,结合螺纹的卷吸速度和载荷分布,利用建立的修正 Archard 磨损模型、热网络模型预测温升变化,并采用修正 W-M 函数分析已加工表面的润滑状态,还研究了混合热弹流润滑点接触的接触闪温、磨损深度和精度损失率。

采用热网络法分析温升变化时,温度节点的选择具有一定的主观性。PRSM 温度场建模的早期研究中,学者普遍以零件的关键特征部位为温度监测节点,通过离散化处理实现温度场的简化求解^[52],但这种选择仍可能导致温升预测存在一定偏差。热网络法依赖节点选择的合理性和准确性,实际复杂结构中的热流路径多样导致节点的主观选取方式无法真实反映系统实际的温度场分布特征,从而影响温升预测的精确性。通过不断优化温度节点选择的合理性和随机性,并选择多组对照,可选出最合理的温度节点。



(a) PRSM 热网络模型^[44]



(b) 热网络法分析流程

图 6 PRSM 热网络分析

Fig.6 PRSM thermal network analysis

2.2.2 实验研究方法

实验研究法通过传感器和其他测量技术实时获取不同工况下 PRSM 的温度场数据,涵盖温度变化范围及各部件在不同热源条件下达到稳定温度所需的时间。实验数据与理论仿真结果的对比可验证理论模型的准确性。同时,深入分析温度升高引起的热变形。这些测量与分析有助于深入理解各部件在实际工况下的热行为,为改进设计

和优化系统提供数据支持和理论依据。

图7所示为持续测试30 min后PRSM最高温度达120℃时的热成像结果^[53],此时的高温显著影响PRSM的可靠性和寿命。乔冠^[44]采用接触式和非接触式相结合的温度测量装置进行了不同轴向载荷、不同丝杠转速、不同润滑脂类型、强制风冷条件下的PRSM温度测试,并在图8所示的实验装置中进行了不同类型润滑脂和外部强制风冷下的温升实验。

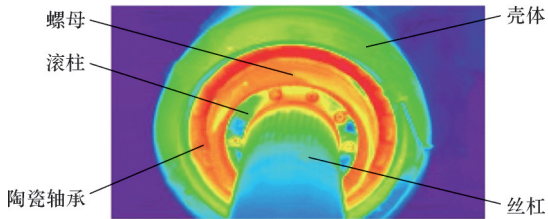
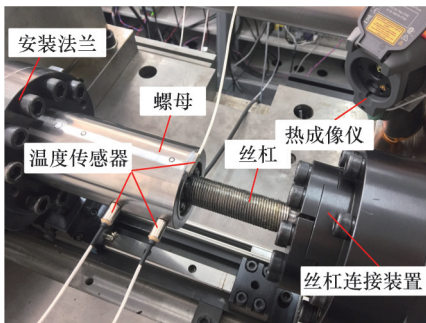
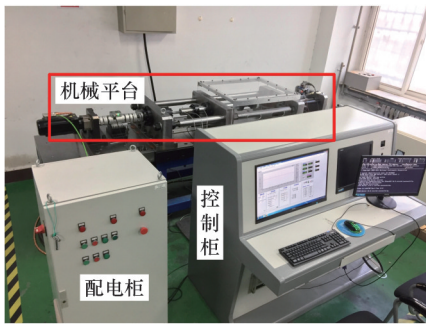


图7 PRSM温度测试^[53]

Fig.7 Thermal imaging result of PRSM



(a)PRSM传动性能测试系统



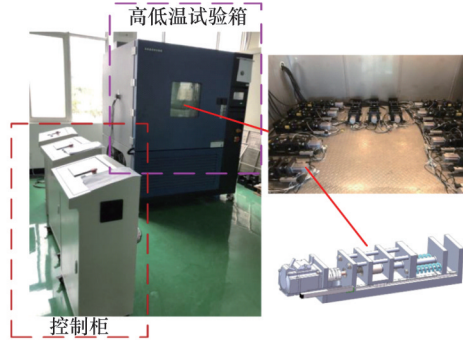
(b)温度测试现场

图8 温度测量装置^[44]

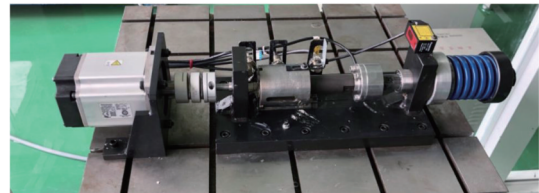
Fig.8 Temperature measuring mechanism^[44]

赵炳荣^[46]设计并搭建了差动式PRSM的高低温耐久试验平台,如图9所示,试验使用接触式温度传感器测量螺母表面的温升,并记录了耐久试验前后丝杠、滚柱和螺母的牙廓参数变化,以及丝杠在常温和高低温下的运行循环次数。CHEN等^[54]考虑温升、振动、转速和负载之间的耦合,设计了PRSM综合性能测试装置,如图10所示,对PRSM承载能力和传动精度进行退化试验,分析了传动效率的变化情况,揭示了PRSM在温度、

振动、转速和载荷耦合作用下的性能退化规律。如图11所示,罗韡等^[55]应用动态测量法,精确测量了丝杠的定位精度、噪声、温升、极限转速和加速度,并通过热误差补偿系统有效提高了定位精度。



(a)试验台整体示意图



(b)常温差动式PRSM耐久试验台

图9 差动式PRSM的高低温耐久试验平台^[46]

Fig.9 The high and low-temperature durability test platform of differential PRSM^[46]

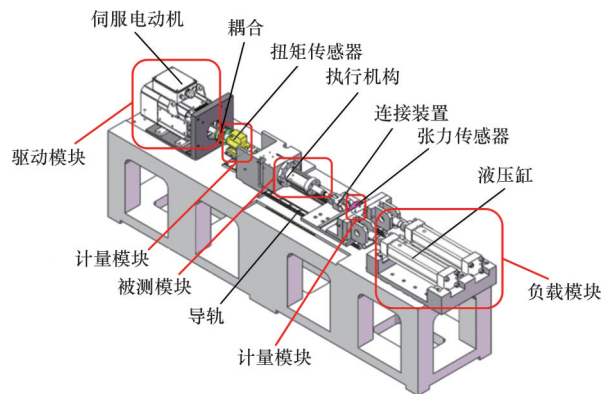


图10 PRSM试验装置^[54]

Fig.10 PRSM test rig^[54]



图11 试验台系统硬件安装图^[55]

Fig.11 Hardware installation diagram of test bench system^[55]

由于测试条件的限制,实验方法只能获得有限数量的温升和热变形,无法全面采集系统各空

间位置的温度场和热变形场在整个工况周期内的连续变化信息,因此,常通过建模量化分析 PRSM 的温度场和热变形场,建立精细的仿真模型以弥补实验数据不足,全面模拟 PRSM 在不同工况下的温度变化和热变形特性。这种建模研究不仅能获得更详细的内部温度和变形分布,还有助于优化设计,提高系统的整体性能和可靠性。总之,数值模拟法和试验研究法的综合应用能深入理解 PRSM 的传热特性,为设计和运行的优化提供理论和实践的支持。

2.3 温升与热力耦合分析

由于 PRSM 温度分布的不均匀性,各部件的热伸长量存在差异,导致位置的偏移,引发热变形。热力耦合分析考虑热载荷和结构载荷的相互影响,明确不同工况下的结构参数、载荷边界条件及关键变量,建立温度场与应力场之间的参数映射关系及数据传递规则,并将热分析获得的温度分布结果作为热载荷,导入至结构力学分析模型中进行耦合求解。

耦合分为直接耦合和间接耦合。直接耦合通过一次求解就可得到耦合分析结果。间接耦合场中,多种求解场相互影响,导致迭代较多、收敛困难、求解难度较大,并对计算机性能要求较高。图 12 所示的 PRSM 热力耦合分析属于单向耦合问题,即假设热变形结果对零件的温度影响很小。任意载荷步或时间点的温度场可作为后续结构变形或应力分析中的热边界条件,进而在 PRSM 有限元模型的基础上得到 PSRSM 位移。

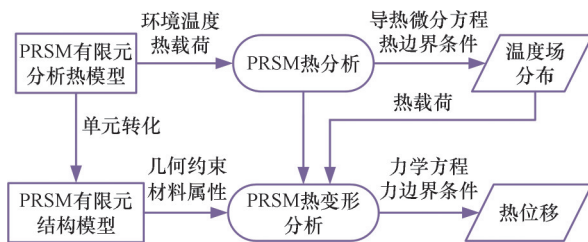


图 12 PRSM 热力耦合分析

Fig.12 PRSM thermo-mechanical coupling analysis

LIZON 等^[56]究了低温下的 PRSM 性能,重点分析了极端温度下的可靠性和安全性,这使 PRSM 在多种低温红外仪器中得到广泛应用。MA 等^[57]为预估中空 PRSM 的温度分布和热误差,建立了基于有限元法的热力耦合模型,研究了 PRSM 滚柱-螺母与滚柱-丝杠的摩擦产热、轴承产热、传热系数等热边界条件的参数计算。该模型可用于研究 PRSM 系统冷却液的温度分布、热误差和冷却性能。QIAO 等^[58]利用有限元方法,

对反向式 PRSM 进行了稳态和瞬态的热力耦合分析,所提热模型可估计反向式 PRSM 的温度场和热变形。MA 等^[59]对 PRSM 在热力耦合作用下的载荷分布特性进行仿真和评估,系统分析了安装方式、载荷量级、温度条件、丝杠转速对载荷分布的影响。MIAO 等^[60]提出一种 PRSM 局部模拟方法,研究接触处的局部温度和应力,根据轮廓参数并利用 W-M 分形函数生成螺纹表面的粗糙度,将 PRSM 的温度和位移分布结果插值到分割实体表面,进行局部热力耦合分析。

ZHANG 等^[61]通过测量 BSM 不同转速下的热伸长量,提出一种基于不同转速热伸长率的温升预测模型,最终求解得到转速与温升、热伸长率的对应关系。WANG 等^[62]研究了 BSM 的热性能,考虑热边界条件的变化,建立了预测温度场和热误差的模型,提出一种减小摩擦力矩和刚度的方法。LI 等^[63]建立了 BSM 的热力耦合模型,评估了 BSM 的瞬态温度场,阐明了热变形与预紧力变化之间的相互作用,为热载荷工况下系统性能的优化设计提供了理论依据。姜歌东等^[64]建立了考虑接触热阻的高速滚珠丝杠副热分析有限元模型,通过仿真计算,得到不同接触热阻下的 BSM 温升特性曲线。

目前,国内外学者对温升和热力耦合的研究多基于常温环境,仅考虑系统内部摩擦产生的热量对温度分布的影响,忽略了极端工作环境的温度场对系统内部温升、接触特性及整体工作性能的耦合作用。因此,有必要引入随工况变化的动态热边界条件,系统研究外部热环境变化对 PRSM 接触力学响应的影响。此外,热效应和机械载荷之间的相互作用会影响 PRSM 内部的载荷分布,但目前的模型往往难以全面反映不同载荷、转速及外部热环境等工况共同作用下的耦合效应。因此,建立考虑多种工况耦合的温升模型和热力耦合模型来揭示 PRSM 的温度及负载分布具有重要工程意义。

3 PRSM 热变形

PRSM 是通过螺纹啮合的大推力、高负载传动机构,不可避免会产生高温。PRSM 工作中产生的摩擦热,以及环境热源均会导致 PRSM 发生热变形,降低传动精度。因此 PRSM 热变形的研究对保证 PRSM 在高温下的正常运行很有意义。

3.1 轴承的发热量

滚动轴承的摩擦力矩产生摩擦热,发热量计

算公式为^[65-67]

$$Q_i = 1.047 \times 10^{-4} M_i n_i \quad (1)$$

$$M_i = M_1 + M_{\nu_0} \quad (2)$$

$$M_1 = f_1 F_{\beta} d_m \quad (3)$$

$$F_{\beta} = \max(0.9F_a / \tan \alpha - 0.1F_r, F_r) \quad (4)$$

$$M_{\nu_0} = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (\nu_0 n_i)^{2/3} d_m^3 & \nu_0 n_i \geq 2000 \\ 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3 & \nu_0 n_i < 2000 \end{cases} \quad (5)$$

式中： Q_i 为轴承的发热量； M_i 为轴承的摩擦力矩； n_i 为丝杠的转速； M_1 为施加载荷引起的轴承摩擦力矩； M_{ν_0} 为与黏性摩擦有关的力矩； f_1 为与轴承类型和载荷相关的系数； F_{β} 为施加在轴承上的等效载荷； d_m 为轴承内径； F_a 、 F_r 分别为轴承轴向载荷和径向载荷； α 为轴承接触角； f_0 为与轴承类型和润滑方式相关的系数； n_i 为丝杠工转速； ν_0 为轴承工作温度下的润滑剂运动黏度。

3.2 PRSM 丝杠螺母副的发热量

PRSM 丝杠螺母副的发热量计算方法和轴承相同，具体的计算公式为

$$H_{RN} = M n_i / 9550 \quad (6)$$

式中： H_{RN} 为丝杠螺母副的发热量； M 为总摩擦力矩。

有预紧力的 PRSM 的总摩擦力矩为

$$M = M_C + M_S + M_{RC} + M_E + M_{PR} \quad (7)$$

无预紧力的 PRSM 的总摩擦力矩为

$$M = M_C + M_S + M_{RC} + M_E \quad (8)$$

式中： M_C 为接触面上差动滑动引起的摩擦力矩； M_S 为滚柱自旋滑动引起的摩擦力矩； M_{RC} 为滚柱与保持架间的摩擦力矩； M_E 为润滑剂引起的黏性摩擦力矩； M_{PR} 为预紧力引起的摩擦力矩^[44]。

3.3 电机的发热量

电机功率损耗产生的发热量为

$$H = \frac{M_T n}{9550} (1 - \eta_1) \quad (9)$$

式中： H 为电机发热量； M_T 为输出力矩； n 为电动机转速； η_1 为机械效率。

3.4 丝杠热变形

PRSM 长时间在高速高载工况下运行时，丝杠的温度升高会引发显著的机构热变形：

$$\Delta L = \rho L \Delta T \quad (10)$$

式中： ρ 为热膨胀系数； L 为丝杠螺纹段有效长度； ΔT 为丝杠温度变化。

4 热误差与优化方法

系统内部温度的升高及非均匀分布导致机械零部件会发生热变形、产生热误差，降低传动精度。PRSM 热误差是评价 PRSM 精度和传动性能的重要指标之一，分析热误差是提高 PRSM 性能的前提。

4.1 PRSM 热误差

精密加工中，热误差占工件总误差的 40%~

70%^[68-69]。PRSM 热误差控制当前的技术路径主要是误差防止与误差补偿。误差防止通过结构设计优化、冷却等途径，尽可能减小或消除设计与制造过程中产生的误差。误差补偿是在分析 PRSM 热变形相关特性的基础上，结合热误差预测模型的计算结果，获得相应的热变形误差，并据此对 PRSM 实施热误差补偿。误差补偿是 PRSM 热误差最有效的解决方法之一，补偿效果主要取决于预测模型的准确性与鲁棒性。

由图 13 可知，PRSM 热误差补偿时，首先采集 PRSM 的实验数据，即先合理布置并校准温度传感器，再采集系统在不同工况运行过程中的温度和热误差。随后，对采集的数据进行预处理，并筛选关键温度测点，建立热误差预测模型。模型验证后，固定和保存模型参数，从而完成热误差预测模型的构建。热误差补偿过程中，先实时采集关键温度测点的温度，并将其输入热误差预测模型，获得相应的热误差预测值，据此实现对 PRSM 的热误差补偿。

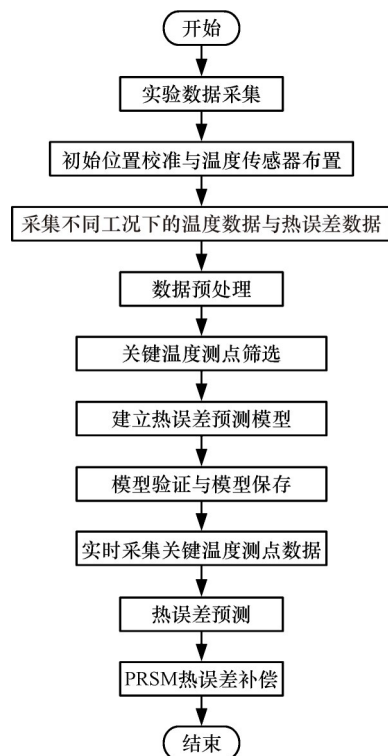


图 13 PRSM 热误差补偿流程图

Fig.13 Flow chart of PRSM thermal error compensation

马尚君等^[70]基于变形协调关系建立了误差、磨损和温度变化的 PRSM 载荷分布模型，研究了无误差、含误差和磨损、含温度变化的载荷分布规律。李郝林等^[71]提出一种基于有限元法的算法来确定螺距热误差的分段补偿量。李醒飞等^[72]研究了单热源作用下的 BSM 温度场模型，并结合热变

理理论与温度场模型预测了BSM的热误差。孙廷英等^[73]建立了RBF神经网络和ARIMA时间序列的混合模型,利用逆向辨识优化算法确定最优权值,建立的热误差预测模型有效提高了热误差预测精度。

4.2 PRSM热误差的调节、控制方法

PRSM的温升不可避免,结构设计应在已知热源条件下优化热传导方向和速度,以减少热变形的影响,如采取有效的散热措施改善热管理效果。自然冷却适用于轻载、转速和精度要求不高的工况,强制冷却分为风冷和水冷,在PRSM外表面施加强制风冷设备以增强对流换热能力,减小系统温升。发热量超出风冷系统的有效散热能力时可采用水冷。如图14所示,在中空丝杠的内孔中安装一根冷却管,通过泵将冷却液输送至冷却管,冷气管末端流出的冷却液通过中空孔反向流回收集槽。冷却液输回冷却箱降温后再循环送回至冷却管。相比于相同黏度的润滑油,润滑脂的油膜强度较高,能将滚柱对丝杠和螺母的接触力分散,使滚道处的接触应力分布更均匀,减少应力集中,减小PRSM的接触变形,显著提升高速重载工况下PRSM的服役性能。然而,在长时间高速重载运行条件下,润滑脂较高的黏度和相对较小的流动性使其更易滞留在丝杠-滚柱-螺母的接触区域。该特性在保证润滑稳定性的同时,也在一定程度上限制了摩擦热向周围结构及外界环境的传导与对流散热,导致局部热量不易及时扩散,从而引起系统内部的温度累积与温度梯度增大。

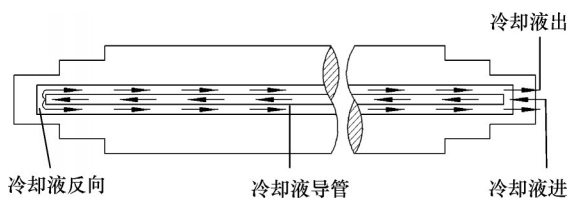


图14 中空丝杠冷却示意图

Fig.14 Schematic diagram of hollow water-cooled screws

建立温度变化与机械部件的热变形的数学模型,计算温度波动引起的误差。伺服控制系统动态补偿该误差,或根据实时监控的温度变化,调整预紧力或应用温度补偿设备等实时校正。系统化的方法能提高设备的运行精度,有效延长PRSM的使用寿命。

4.3 PRSM热误差优化方法

20世纪中叶以来,采用优化技术的精度分配方法逐渐发展^[74],其核心思想是将精度分配问题转化为优化问题进行求解。热误差具有高度的非

线性,影响因素多且相互耦合,如何有效优化和减小热误差已成为研究重点,但PRSM热误差优化的研究较少。

如表1所示,SIMON^[75]采用计算机辅助的弧齿锥齿轮非匹配齿面接触分析方法,得到最优齿形修行参数。DING等^[76]通过引入渗碳-啮合的耦合效应,建立了数据驱动的热处理变形预测与优化方法,提高了齿轮齿面的接触性能和几何精度。SUN等^[77]基于单因素与正交试验,并结合BP神经网络和PSO算法,优化热处理的关键工艺参数,实现了齿轮的热变形控制与加工精度提升。胡宗延等^[78]提出一种基于微分运动与多体系统理论的大规格数控滚齿机多源误差建模方法,建立了包含76项误差的大规格数控滚齿机多源误差综合模型。GAO等^[41]通过正交试验优化的材料配比和喷嘴流量,讨论了纳米涂层设计参数对热变形的影响规律。杨赫然等^[79]采用Tent混沌改进松鼠搜索算法来提高热误差预测精度。WU等^[80]利用小波神经网络(wavelet neural network, WNN)构建BSM热变形与热源温度网络模型。LIU等^[81]通过粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)确定最优热源分布,采用多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)优化混合响应面(hybrid response sur-

表1 齿轮与BSM热误差优化

Table 1 Thermal error optimization of gear and BSM

文献	方法	优点
文献[75]	计算机辅助分析	基于接触分析得出最优的齿形修行方案
文献[76]	渗碳-啮合耦合热处理优化方法	考虑耦合效应,提高齿轮齿面的接触和物理性能
文献[77]	采用单因素实验与正交试验相结合的方法构建BP神经网络模型,通过PSO算法优化模型参数	通过热处理优化关键工艺参数,可为齿轮减齿工艺中的变形控制与加工精度提高提供参考
文献[78]	微分运动与多体系统理论的大规格数控滚齿机多源误差建模方法	可用于不同结构的机床综合误差建模
文献[79]	通过正交试验优化纳米涂层配比	优化BSM涂层的材料配比、喷嘴流量,有效降低系统温升、抑制热变形
文献[41]	Tent混沌改进松鼠搜索算法	提高热误差预测精度及BP神经网络算法的预测精度
文献[80]	利用WNN构建BSM热变形与热源温度网络模型,PSO确定BSM最优的热源分布	明确BSM热源与热变形关系,优化冷却方案
文献[81]	HRS的多目标、多参数优化模型,MOGA优化热边界条件	可在设计阶段获取BSM进给传动系统在不同工况下的热特性,避免重复实验

face, HRS)的热边界条件,从而在设计阶段精准预测BSM进给传动系统的热特性,优化冷却方案,并避免重复实验。

齿轮和BSM的热误差优化主要依赖计算机模拟、有限元分析、实验方法、优化算法,PRSM热误差优化的研究较为薄弱。借鉴齿轮和BSM领域的相关研究成果,开展PRSM热误差的建模、预测与优化方法研究,提高其在复杂环境下的适应性与可靠性。

5 结论

PRSM在工作过程中产生大量的热,使PRSM系统内部温度升高。温升不仅影响系统的运行效率和精度,还加速零件的磨损、缩短寿命。从PRSM的结构组成和热特性出发,基于PRSM的结构组成及其热特性,围绕热源分析、热特性分析方法、温升与热力耦合、热变形、热误差及其优化方法,综述了PRSM热特性的研究工作。需在以下几个方面开展深入的研究与分析,以完善PRSM热特性研究的理论与实验体系。

1)建立考虑极端温度、动态热环境、润滑方式、转速、外载荷和安装方式等因素的热结构耦合模型。长时间高速重载工况下,PRSM系统内部的热量无法通过润滑油及时排除,导致内部温度分布不均,影响其内部热应力的分布,加剧部件的热变形。

2)PRSM的有限元热分析中,虽然简化模型的整体变化趋势与实际工作环境中的变化相符,但仍存在一定差异,将来应着力建立更贴合实际工况的有限元模型。

3)通过优化螺纹牙形状、设计冷却装置、选择合适的冷却液等措施,减少系统产生的热量,以减小PRSM的热误差。

目前,PRSM热特性的研究集中在常温和材料各向同性的假设下,较少考虑极端温度、动态热环境及材料对温度分布和性能的影响。未来研究应关注新型材料的应用、智能化热管理系统的开发、多物理场耦合分析方法的完善。热特性与承载力的相互作用影响内部载荷的分布,润滑方式也会影响温升,而现有模型常没有考虑热特性、承载力和润滑方式的多种热力耦合关系。虽然PRSM的热误差研究较少,但可借鉴齿轮与BSM等领域的热误差预测、优化和耦合建模方法。因此,后续研究应着力开发更为全面的热结构模型,以提升PRSM的服役性能和应用范围。

参考文献:

- [1] HU Rui, WEI Peitang, DU Xuesong, et al. Multi-objective Optimization and Accelerated Experimental Research on Load Distribution of Planetary Roller Screw Mechanism [J]. Tribology International, 2024, 199: 110046.
- [2] 吴翰林, 魏沛堂, 蔡磊, 等. 基于加工误差敏感度与模糊层次分析法的行星滚柱丝杠公差匹配优化方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(22): 2693-2703.
WU Hanlin, WEI Peitang, CAI Lei, 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.
- [3] ARRIOLA D, THIELECKE F. Model-based Design and Experimental Verification of a Monitoring Concept for an Active-active Electromechanical Aileron Actuation System [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 322-345.
- [4] QIAO Guan, LIU Geng, SHI Zhenghong, et al. A Review of Electromechanical Actuators for More/all Electric Aircraft Systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(22): 4128-4151.
- [5] XING Mingcai, ZHANG Bohong, DENG Pan, et al. A Novel Wear Prediction Model for Planetary Roller Screw Based on Universal Sliding Distance Model[J]. Tribology International, 2022, 175: 107851.
- [6] 付晓军, 刘更, 马尚君. 行星滚柱丝杠副啮合与运动特性的理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 92.
FU Xiaojun, LIU Geng, MA Shangjun. Theoretical and Experimental Study on Meshing and Motion Characteristics of Planetary Roller Screw Pair[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 92.
- [7] CAI Wei, FU Xiaojun, MA Shangjun, et al. Meshing Characteristics Analysis of Planetary Roller Screw Mechanism with Misalignment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(9): 3794-3806.
- [8] YAO Qin, ZHANG Mengchuang, LIU Yongshou, et al. Multi-objective Optimization of Planetary Roller Screw Mechanism Based on Improved Mathematical Modelling [J]. Tribology International, 2021, 161: 107095.
- [9] YAO Qin, ZHANG Mengchuang, MA Shangjun. Structural Design for Planetary Roller Screw Mechanism Based on the Developed Contact Modelling[J]. Tribology International, 2022, 171: 107570.
- [10] HE Huilin, WEI Peitang, LIU Huaiju, et al. Three-dimensional Parametric Contact Analysis of Planetary Roller Screw Mechanism and Its Application in Grouping for Selective Assembly[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2024, 19(1): 2.
- [11] 李路路, 王海伟, 刘更, 等. 新型行星滚柱滚轮复合传动装置原理及运动学分析[J]. 机械传动, 2022, 46(5): 53-61.
LI Lulu, WANG Haiwei, LIU Geng, et al. Principle and Kinematics Analysis of a New Planetary Roller and Roller Pinion Compound Transmission Device[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(5): 53-61.
- [12] XING Mingcai, ZHANG Bohong, DENG Pan, et al. A Comprehensive Analysis of Contact Kinematics for Planetary Roller Screw Mechanism [J]. Tribology International, 2023, 179: 108127.
- [13] WANG Chang, ZHANG Caixia, CHENG Qiang, et al.

- Kinematic Modeling of a Planetary Roller Screw Mechanism Considering Runout Errors and Elastic Deformation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(11): 4455-4463.
- [14] MA Shangjun, WU Linping, FU Xiaojun, et al. Modeling of Static Contact with Friction of Threaded Surfaces in a Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 139: 212-236.
- [15] MA Shangjun, WU Linping, LIU Geng, et al. Local Contact Characteristics of Threaded Surfaces in a Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020, 48(1): 1-26.
- [16] HU Rui, WEI Peitang, DU Xuesong, 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.
- [17] XING Mingcai, LIU Shuo, CUI Yi, et al. A Comprehensive Sliding Wear Prediction Method for Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Wear*, 2024, 558: 205536.
- [18] XIE Zhijie, WANG Yu, NI Jianan, et al. Friction Torque Analysis of Planetary Roller Screw Based on the Creepage Theory [J]. *Tribology International*, 2023, 178: 108059.
- [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] 刘柱, 范元勋. 行星滚柱丝杠传动效率试验台设计 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(12): 108-110.
- LIU Zhu, FAN Yuanxun. Experimental Study on Efficiency Measurement of Planetary Roller Screw [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Technique*, 2019(12): 108-110.
- [21] 江俊麟, 夏颀, 张文君. 行星滚柱丝杠 1000 N·m 传动效率试验台测量控制系统设计 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2023, 61(5): 52-57.
- JIANG Junlin, XIA Kun, ZHANG Wenjun. Design of Measurement and Control System for 1000 N·m Transmission Efficiency Test-bed of Planetary Roller Lead Screw [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2023, 61(5): 52-57.
- [22] QIAO Guan, LIAO Rong, GUO Shijie, et al. Design and Dynamic Analysis of the Recirculating Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 35(1): 87.
- [23] FU Xiaojun, LIU Geng, MA Shangjun, et al. An Efficient Method for the Dynamic Analysis of Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 150: 103851.
- [24] HU Rui, WEI Peitang, LIU Huaiju, et al. Investigation on Load Distribution among Rollers of Planetary Roller Screw Mechanism Considering Machining Errors: Analytical Calculation and Machine Learning Approach [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 185: 105322.
- [25] HU Rui, WEI Peitang, ZHOU Pengliang, et al. A Roller Taper Modification Method for Load Distribution Optimization of Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2022, 16(3): JAMDSM0032.
- [26] 杨家军, 施建华, 朱继生, 等. 行星滚柱丝杠副热特性与热变形抑制研究 [J]. *湖北工业大学学报*, 2014(4): 1-4.
- YANG Jiajun, SHI Jianhua, ZHU Jisheng, et al. Analysis of Thermal Characteristics and Thermal Deformation Control of the Planetary Roller Screw [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2014(4): 1-4.
- [27] 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.
- [28] 施建华. 行星滚柱丝杠副热特性与发生特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- SHI Jianhua. Research of Thermal and Particle Generation Characteristics for Planetary Roller Screw [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [29] MA Shangjun, LIU Geng, TONG Ruiting, 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.
- [30] MIAO Jiacheng, WANG Shuyan, SHAN Xiping, et al. Investigation on Contact Behavior of Planetary Roller Screw Mechanism Considering Thermal Deformation [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2023, 47(1): 89-111.
- [31] 商鹏, 高长建, 韩忠建, 等. 精密滚珠丝杠螺母副热平衡-温升特性仿真研究 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(7): 725-732.
- SHANG Peng, GAO Changjian, HAN Zhongjian, et al. Simulation Study on Thermal Balance-Temperature Rise Characteristics of a Precision Ball Screw-Nut Pair [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(7): 725-732.
- [32] QIU Yalan, ZHOU Changguang, YiOU, et al. Theoretical and Experimental Analysis of the Temperature Rise of a Ball Screw [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(1): 703-715.
- [33] SONG Lei, LIU Kuo, LIU Hongqiang, et al. Frictional Heating Effect of Ball Screw Pairs for Machine Tools: a New Calculation Method [J]. *Tribology International*, 2024, 194: 109459.
- [34] SHENG Xin, LIU An, GAO Chen, et al. Radial Temperature Gradient Investigation of the Large-diameter Ball Screw Based on Mathematical Modelling [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 153: 107367.
- [35] WU Huayang, LI Jiejing, LIU Haixu, et al. An Analysis of Heat Source Contribution and Design of Optimal Cooling Method for Ball Screw Feed System [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2025, 38(2): 200-215.
- [36] 陈婉, 王科社, 宋杰, 等. 高性能滚珠丝杠副有限元热分析 [J]. *新型工业化*, 2016, 6(11): 58-63.
- CHEN Wan, WANG Keshe, SONG Jie, et al. Thermal Analysis of High Performance Ball Screw Pair by Finite Element Method [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2016, 6(11): 58-63.
- [37] 韩军, 张玲聪, 李明亚. 高速实心/空心滚珠丝杠热变形受轴承副摩擦热影响分析 [J]. *机械设计*, 2017, 34(3): 63-69.
- HAN Jun, ZHANG Lingcong, LI Mingya. Analysis of High Speed Solid/Hollow Ball Screw Thermal Deformation Caused by Bearing Pair Friction Heat [J]. *Journal of Machine Design*, 2017, 34(3): 63-69.
- [38] SHI Hu, MA Chi, YANG Jun, et al. Investigation into Ef-

- fect of Thermal Expansion on Thermally Induced Error of Ball Screw Feed Drive System of Precision Machine Tools [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2015, 97: 60-71.
- [39] GAO Xiangsheng, GUO Yueyang, HANSON D A, et al. Thermal Error Prediction of Ball Screws Based on PSO-LSTM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(5): 1721-1735.
- [40] WANG Min, LU Wenlong, ZHANG Kuan, et al. Thermal Error Prediction of Ball Screws in Full-time Series Using Working Condition Data Based on a Mechanism and Data Hybrid-driven Model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 133(3): 1443-1462.
- [41] GAO Xiangsheng, ZHANG Kuan, WANG Min, et al. Optimization of Nano Coating to Reduce the Thermal Deformation of Ball Screws [J]. *Nanotechnology Reviews*, 2021, 11(1): 438-451.
- [42] 徐阳阳, 祖莉, 汪远远, 等. 滚珠丝杠副热变形模型理论分析及其对定位精度影响的试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(1): 1-3.
XU Yangyang, ZU Li, WANG Yuanyuan, et al. Theoretical Analysis and Experimental Study of Thermal Deformation Model of Ball Screw and Its Influence on Positioning Accuracy[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(1): 1-3.
- [43] 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.
- [44] 乔冠. 行星滚柱丝杠副摩擦力矩及热特性的理论与实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
QIAO Guan. Theoretical and Experimental Research on the Friction Torque and Thermal Characteristics of the Planetary Roller Screw Mechanism[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [45] MIAO Jiacheng, DU Xing, LI Chaoyang, 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.
- [46] 赵炳荣. 差动式行星滚柱丝杠热耦合分析及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
ZHAO Bingrong. Thermal Coupling Analysis and Experimental Study of Differential Planetary Roller Screw [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [47] DU Chuanming, LIU Geng, QIAO Guan, et al. Transient Thermal Analysis of Standard Planetary Roller Screw Mechanism Based on Finite Element Method [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(12): 1687814018812305.
- [48] 李巧, 侯红玲, 王艳茹, 等. 循环式行星滚柱丝杠副的热力耦合特性研究[J]. *锻压技术*, 2021, 46(2): 160-165.
LI Qiao, HOU Hongling, WANG Yanru, et al. Study on Thermal Mechanical Coupling Characteristics of Circulating Planetary Roller Screw Pair [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46(2): 160-165.
- [49] 许鹿辉, 范元勋, 李晓飞. 高过载脂润滑滚珠丝杠副流固耦合分析[J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(1): 20-23.
XU Luhui, FAN Yuanxun, LI Xiaofei. Analysis of Fluid-structure Coupling of High Overload Grease Lubricated Ball Screw Pair [J]. *Machine Building & Automation*, 2024, 53(1): 20-23.
- [50] 李雪晓, 段明德, 毕星瑞. 实心/空心滚珠丝杠动态、静态的热特性分析计算[J]. *制造技术与机床*, 2023(4): 163-168.
LI Xuexiao, DUAN Mingde, BI Xingrui. Analysis and Calculation of Dynamic and Static Thermal Characteristics of Solid/Hollow Ball Screw [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(4): 163-168.
- [51] QIAO Guan, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Thermal Characteristics Analysis and Experimental Study of the Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1345-1358.
- [52] GU Weikai, LI Chaoyang, MIAO Jiacheng, et al. Wear Prediction Method of Differential Planetary Roller Screws Considering the Ambient Temperature Variations [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10609.
- [53] GRAND S and VALEMBROID J M. Electromechanical Actuators Design for Thrust Vector Control [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components*. Toulouse, 2004: 21-27.
- [54] CHEN Kui, ZHAO Yongsheng, ZHENG Jigui, et al. Performance-degradation Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism under Multi-factor Coupling Effects [J]. *Sensors*, 2024, 24(14): 4460.
- [55] 罗韡, 陈兴辉, 王琛琛, 等. 基于热误差补偿的行星滚柱丝杠综合性能试验台设计与分析[J]. *农业装备与车辆工程*, 2024, 62(1): 173-177.
LUO Wei, CHEN Xinghui, WANG Chenchen, et al. Design and Analysis of Comprehensive Performance Test-bed for Planetary Roller Screw Based on Thermal Error Compensation [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2024, 62(1): 173-177.
- [56] LIZON J L. Planetary Roller Screw for Cryogenic Applications [C]// *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V*. Montreal, 2022: 154.
- [57] MA S J, LIU G, QIAO G, et al. Thermo-mechanical Model and Thermal Analysis of Hollow Cylinder Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2015, 43(3): 359-381.
- [58] QIAO Guan, LIU Geng, MA Shangjun, 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.
- [59] MA Shangjun, ZHANG Chenhui, ZHANG Tao, et al. Thermo-mechanical Coupling - Based Finite Element Analysis of the Load Distribution of Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(6): 1687814018775254.
- [60] MIAO Jiacheng, DU Xing, LI Chaoyang, et al. Multi-scale Modelling of the Thermally Coupled Planetary Roller Screw Mechanism with Curved Fractal Contact [J]. *Meccanica*, 2022, 57(11): 2771-2795.
- [61] ZHANG Luchao, YiOU, FENG Hutian. Prediction of the Thermal Elongation of the Ball Screw Mechanism under Various Rotational Speeds [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(7): 1221-1228.
- [62] WANG Haitong, LI Fuhua, CAI Yonglin, et al. Experimental and Theoretical Analysis of Ball Screw under Thermal Effect [J]. *Tribology International*, 2020, 152: 106503.

- [63] LI Tiejun, WANG Mengzhuo, ZHANG Yimin, et al. Real-time Thermo-mechanical Dynamics Model of a Ball Screw System Based on a Dynamic Thermal Network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(1): 613-624.
- [64] 姜歌东, 王昊, 荆亚彬. 接触热阻对高速滚珠丝杠副温升特性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(6): 1915-1922.
- JIANG Gedong, WANG Hao, JING Yabin. Influence of Contact Thermal Resistance on the Temperature Rise Characteristics of High-speed Ball Screw[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2025, 55(6): 1915-1922.
- [65] XU Z Z, LIU X J, KIM H K, et al. Thermal Error Forecast and Performance Evaluation for an Air-cooling Ball Screw System[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(7/8): 605-611.
- [66] JIN Chao, WU Bo, HU Youmin. Heat Generation Modeling of Ball Bearing Based on Internal Load Distribution[J]. Tribology International, 2012, 45(1): 8-15.
- [67] SATHIYA MOORTHY R, PRABHU RAJA V. An Improved Analytical Model for Prediction of Heat Generation in Angular Contact Ball Bearing[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(11): 8111-8119.
- [68] BRYAN J. International Status of Thermal Error Research (1990)[J]. CIRP Annals, 1990, 39(2): 645-656.
- [69] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J, UHLMANN E, et al. Thermal Issues in Machine Tools [J]. CIRP Annals, 2012, 61(2): 771-791.
- [70] 马尚君, 李晓风, 刘更, 等. 误差-磨损-温度变化耦合的行星滚柱丝杠副载荷分布[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(4): 655-660.
- MA Shangjun, LI Xiaofeng, LIU Geng, et al. Load Distribution of Planetary Roller Screw Mechanisms with Error Wear Temperature Coupling[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(4): 655-660.
- [71] 李郝林, 陈琳. 滚珠丝杠磨削加工热变形误差的分段补偿方法[J]. 工具技术, 2009, 43(6): 53-54.
- LI Haolin, CHEN Lin. Segmented Compensation Algorithm for Thermal Deformation Error of Ball Screw in Grinding[J]. Tool Engineering, 2009, 43(6): 53-54.
- [72] 李醒飞, 董成军, 陈诚, 等. 单热源作用下滚珠丝杠的温度场建模与热误差预测[J]. 光学精密工程, 2007, 20(2): 337-343.
- LI Xingfei, DONG Chengjun, CHEN Cheng, et al. Temperature Model of Ball Screw and Its Thermal Error Prediction under Single Heat[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 20(2): 337-343.
- [73] 孙廷英, 张义民, 李铁军. 混合神经网络用于滚珠丝杠热误差预测[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 58-60.
- SUN Tingying, ZHANG Yimin, LI Tiejun. Application of Hybrid Neural Network in Predicting Thermal Error of Ball Screw[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 58-60.
- [74] HALLMANN M, SCHLEICH B, WARTZACK S. From Tolerance Allocation to Tolerance-cost Optimization: a Comprehensive Literature Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(11): 4859-4912.
- [75] SIMON V. Influence of Tooth Errors and Misalignments on Tooth Contact in Spiral Bevel Gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(10): 1253-1267.
- [76] DING Han, LI Hongping, HUANG Rong, et al. Adaptive Data-driven Prediction and Optimization of Tooth Flank Heat Treatment Deformation for Aerospace Spiral Bevel Gears by Considering Carburizing-meshing Coupling Effect[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 174: 121301.
- [77] SUN Beier, LIU Huaming, TANG Jinyuan, et al. Optimization of Heat Treatment Deformation Control Process Parameters for Face-hobbed Hypoid Gear Using FEA-PSO-BP Method [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 117: 40-58.
- [78] 胡宗延. 基于微分运动的大规格滚齿机多源误差建模与补偿方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- HU Zongyan. Research on Multi-Source Error Modeling and Compensation Method for Large-scale Hobbing Machine Based on Differential Kinematics [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [79] 杨赫然, 李帅, 孙兴伟, 等. 基于改进松鼠搜索算法优化神经网络的数控机床进给系统热误差预测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 60-69.
- YANG Heran, LI Shuai, SUN Xingwei, et al. Thermal Error Prediction of CNC Machine Tool Feed System Based on Neural Network Optimized by Improved Squirrel Search Algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 60-69.
- [80] WU Huayang, LI Jiejing, LIU Haixu, et al. An Analysis of Heat Source Contribution and Design of Optimal Cooling Method for Ball Screw Feed System[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2025, 38(2): 200-215.
- [81] LIU Jialan, MA Chi, WANG Shilong, et al. Thermal Boundary Condition Optimization of Ball Screw Feed Drive System Based on Response Surface Analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 471-495.

(编辑 张洋)

作者简介: 乔冠,男,1990年生,副教授,硕士研究生导师。研究方向为行星滚柱丝杠副传动、人形机器人一体化关节。发表论文20余篇。E-mail: qiaoguan@imut.edu.cn。唐术锋(通信作者),男,1981年生,教授、博士研究生导师。研究方向为动力学与控制、机电装备设计及系统集成技术、特殊服役机器人。发表论文30余篇。E-mail: tangshufeng@imut.edu.cn

本文引用格式:

乔冠,陈佳琪,唐术锋,等. 行星滚柱丝杠副热特性研究现状[J]. 中国机械工程, 2026, 37(1): 162-173.

QIAO Guan, CHEN Jiaqi, TANG Shufeng, et al. A Review of Thermal Characteristics for Planetary Roller Screw Mechanisms [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 162-173.