

# 行星滚柱丝杠螺纹加工误差统计分析国内外对比研究

刘思奇<sup>1</sup> 魏沛堂<sup>1\*</sup> 胡瑞<sup>1</sup> 杜雪松<sup>1</sup> 罗莉<sup>1</sup> 朱才朝<sup>1</sup> 周鹏亮<sup>2</sup>

1. 重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室, 重庆, 400044

2. 贵州群建精密机械有限公司, 遵义, 563000

**摘要:**行星滚柱丝杠副(PRSM)是一种新型精密螺纹传动装置。目前,由于小螺距硬齿面精密螺纹磨削加工困难,PRSM精密螺纹加工精度难以保证,导致国内外产品在承载能力、行程精度及传动效率等性能方面差距显著。选取国内外典型型号PRSM产品开展螺纹加工误差的统计、分析及对比研究。首先利用接触式测量方法检测了丝杠、滚柱及螺母螺纹轴向廓形,并根据梯度阈值法及轴法转换理论等评价技术,对螺纹中径误差、螺距误差、偏心误差及牙型角误差等误差进行评价与统计分析。在此基础上,阐述了丝杠中径锥度、多头螺纹螺距周期性波动等PRSM螺纹典型异常加工结果的产生机理,并针对螺纹加工质量调控提出了相应的工艺优化策略,为国产PRSM螺纹高效精密磨削与性能提升提供了支撑。

**关键词:**行星滚柱丝杠副;加工误差;统计分析;工艺优化;精密磨削

中图分类号:TH132.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Statistical Analysis of Planetary Roller Screw Thread Machining Errors and Comparative Study at Home and Abroad

LIU Siqu<sup>1</sup> WEI Peitang<sup>1\*</sup> HU Rui<sup>1</sup> DU Xuesong<sup>1</sup> LUO Li<sup>1</sup> ZHU Caichao<sup>1</sup> ZHOU Pengliang<sup>2</sup>

1.State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing, 400044

2.Guizhou Qunjian Precision Machinery Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563000

**Abstract:** PRSM was a new type of precision threaded transmission mechanisms. Currently, due to the difficulty in grinding small pitch hard tooth profile precision threads, ensuring the machining accuracy of PRSM precision threads was challenging, which led to a significant gap between domestic and foreign products in terms of load-bearing capacity, travelling accuracy and transmission efficiency and other performance aspects. This paper selected typical PRSM products from domestic and foreign markets to conduct statistical, analytical, and comparative research on thread machining errors. First, the axial profile of the screw, roller and nut thread was detected based on the contact measurement method. Evaluation techniques such as gradient threshold method and axis transformation theory were employed to assess and statistically analyze errors including pitch diameter errors, pitch errors, eccentricity errors, and tooth profile angle errors. Based on these analyses, the paper elaborated on the mechanism behind typical irregularities in PRSM thread machining, such as taper in pitch diameters and periodic fluctuations in multi-start thread pitches. Furthermore, corresponding process optimization strategies were proposed for quality control in thread machining, aiming to support efficient precision grinding and performance enhancement of domestic PRSM threads.

**Key words:** planetary roller screw mechanism(PRSM); machining error; statistical analysis; process optimization; precision grinding

### 0 引言

行星滚柱丝杠副(planetary roller screw mechanism, PRSM)是一种新型精密螺纹传动装

置,其核心零部件包括丝杠、滚柱、螺母、内齿圈及保持架等。其中,丝杠和螺母为多头直线型螺纹牙形,滚柱为单头圆弧形螺纹牙形<sup>[1]</sup>。通常丝杠周围均匀分布6~12根滚柱,通过内外螺纹啮合完成丝杠旋转运动到螺母直线运动的转换。PRSM具有高承载、高精度、长寿命、抗冲击及小

收稿日期:2024-07-11

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3406404)

体积等卓越性能,广泛应用于航空航天、武器装备、工业机器人及医疗器械<sup>[2-6]</sup>等军民领域全电化、智能化、低碳化机械装备中。

瑞典人 Strandgren 于 1942 年发明了循环式 PRSM, 此后又提出了反向式、标准式 PRSM, 奠定了 PRSM 的基础设计理论<sup>[7-9]</sup>。20 世纪 70 年代起, 随着工业制造水平的提高及武器装备、高档机床等领域对直线运动装置的要求日渐提高, PRSM 开始受到国外学者和企业的关注, 瑞典 SKF、瑞士 Rollvis、GSA 等专业生产厂家先后成立, 经过 50 余年的发展后形成了生产技术和全球高端市场的垄断。国外已将 PRSM 在航空航天、武器装备等领域进行了应用, 如美国 F-35B 战斗机起落架、欧洲“织女星”运载火箭推力矢量控制系统等均采用 PRSM 作为执行机构; 而国内在 20 世纪末才开始有少数科研机构及企业针对 PRSM 结构设计、参数匹配等基础理论进行研究和样机研制<sup>[10-11]</sup>。经过二十余年的发展, 国内已完成了样机试制, 但目前仍处于小批量生产及试验验证阶段, 加工质量低、生产成本低、整机性能差等问题突出, 在航空航天、武器装备、人形机器人等高端机械装备领域中尚未推广应用。

磨削作为 PRSM 小螺距硬廓面精密螺纹加工的主要方式, 其加工工艺是 PRSM 的核心壁垒, 而磨削工艺优化是螺纹加工质量调控的有效手段。XU 等<sup>[12]</sup>利用正交试验对 PRSM 内螺纹的精密磨削进行了系统的实验研究, 结果表明, 砂轮修整过程中修整量对牙型角的影响最大, 磨削过程中砂轮线速度对牙型角的影响显著。FANG 等<sup>[13]</sup>建立了一种基于有效等效砂轮直径和砂轮与工件之间弹性挠度的内螺纹磨削表面质量预测模型, 发现较小的主轴转速及螺旋角有助于提高表面质量。ZHANG 等<sup>[14]</sup>通过单因素实验研究了砂轮线速度、头架转速及磨削进给量对螺纹表面质量的影响, 发现提高砂轮线速度、减小磨削进给量可以提高表面精度。螺纹加工精度的检测及其对加工工艺的反馈指导是提高螺纹加工质量的关键环节。徐洪伟等<sup>[15]</sup>基于非线性内点算法提出了小螺距 PRSM 滚柱牙型非接触式检测评价方法, 并通过实验验证了该方法的检测精度及可行性。与加工制造相比, 目前关于 PRSM 精密螺纹加工精度检测的研究相对较少, 大部分研究仍沿用普通螺纹的检测评价方法, 其精度难以保证, 难以作为磨削工艺优化提供有效指导。

作为 PRSM 中传递运动和动力的螺纹部件, 丝杠、滚柱和螺母的螺纹加工精度直接决定了整机性能。MAMAEV 等<sup>[16]</sup>通过实验探究了各部件运动误差对 PRSM 位移的影响, 发现影响 PRSM 传动精度的主要因素是齿轮及螺纹的加工误差。HU 等<sup>[17-18]</sup>基于等效载荷理论和多点接触变形协调-力平衡方程建立了多加工误差耦合的 PRSM 载荷分布计算模型, 发现丝杠和螺母的偏心误差对滚柱间载荷分布的影响显著。FU 等<sup>[19-20]</sup>、MA 等<sup>[21-22]</sup>基于微分误差矢量及矩阵概念建立了考虑螺纹及齿轮误差耦合的 PRSM 行程误差分析模型, 结果表明行程误差随丝杠旋转呈现周期性波动且偏心误差对行程误差的影响起主导作用。WU 等<sup>[23]</sup>采用解析计算和机器学习方法分析了关键螺纹误差对 PRSM 行程精度的影响规律, 结果表明累积螺距误差、丝杠和螺母的偏心误差是影响行程精度的主要因素。综上, 目前国内外对加工误差的研究主要集中于其对各项性能的影响规律分析, 关于加工误差的来源、产生机理及相应调控方法的研究报道较少。

目前, 由于小螺距硬齿面精密螺纹磨削加工困难, 且国产 PRSM 设计制造关键技术尚未成熟, PRSM 精密螺纹加工与检测精度难以保证, 导致现有样机的加工质量及整机性能差距显著, 成为我国高端装备国产化替代的“卡脖子”瓶颈。为此, 本文选取国内外典型型号 PRSM 产品, 采用接触式测量方法, 开展了丝杠、滚柱及螺母螺纹轴向廓形检测及螺纹中径误差、螺距误差、偏心误差及牙型角误差等误差的评价、统计与对比分析, 阐述了目前国内外 PRSM 加工水平的差距以及丝杠中径锥度、多头螺纹螺距周期性波动等 PRSM 螺纹加工的典型异常加工现象的产生机理, 并针对螺纹加工质量调控提出了相应的工艺优化方法。

## 1 PRSM 样机

PRSM 结构如图 1 所示。

本研究选取的样机为丝杠中径从 15~30 mm、在航空航天领域中最常用的 5 款典型型号样机, 样机实物图见图 2, 型号依次命名为 A-2506、B-1806、C-3005、D-1505、E-2005。其中, A-2506 样机为瑞士 GSA 公司生产的 PRSM 产品, 其丝杠公称直径为 25 mm, 导程为 6 mm。GSA 公司作为知名的 PRSM 专业生产厂家, 占据

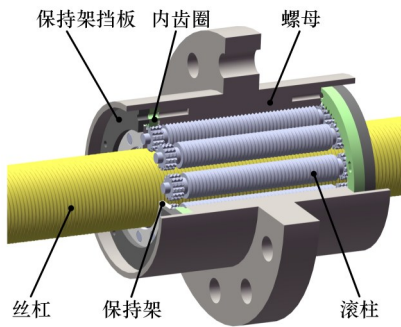


图1 PRSM 结构

Fig.1 PRSM structure

全球绝大多数的高端市场,其产品制造水平代表了国际一流水平;B-1806、C-3005、D-1505、E-2005样机来自国内不同厂家,代表国内主流制造水平。各样机结构参数见表1。

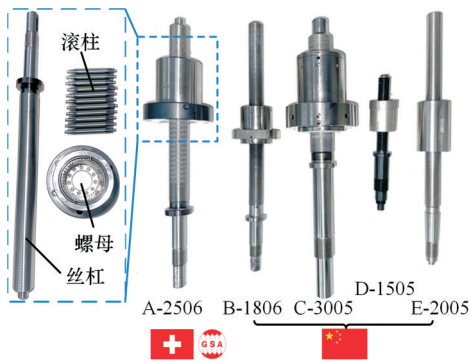


图2 PRSM 样机实物及编号

Fig.2 PRSM prototype object and its number

表1 样机结构参数

Tab.1 Prototype structure parameters

型号	A-2506	B-1806	C-3005	D-1505	E-2005
丝杠中径/mm	23.94	18.82	29.95	14.94	19.45
滚柱中径/mm	8.0	6.3	10.0	5.0	6.5
螺母中径/mm	40.0	31.5	50.0	25.0	32.5
螺距/mm	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0
牙型角/(°)	45	45	45	45	45
滚柱个数	11	10	10	10	10
丝杠、螺母螺纹头数	5	5	5	5	5
滚柱螺纹头数	1	1	1	1	1
丝杠螺旋升角/(°)	3.793	5.767	3.037	6.056	4.666
滚柱螺旋升角/(°)	2.734	3.468	1.823	3.643	2.804
螺母螺旋升角/(°)	2.734	3.468	1.823	3.643	2.804

PRSM通常面临高转速、大负载的工作要求,需要选用耐磨性强、硬度高、承载能力强且具有良好的温度适应性的材料。作为高碳铬轴承钢,GCr15被广泛应用于轴承和滚珠丝杠副等滚动功能部件的生产制造中,经淬火后具有较高的硬度及良好的耐磨性和抗疲劳性能<sup>[24]</sup>,也成为加工PRSM的主要材料之一,该材料的化学成分

见表2<sup>[25]</sup>。

表2 GCr15的化学成分(质量分数)<sup>[25]</sup>

Tab.2 GCr15 chemical composition(mass fraction)<sup>[25]</sup> %

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	1.4~1.65	<0.1

国内PRSM试件热处理工艺中,一般采用球化退火作为预备热处理来改善材料的切削性能;之后采用调质处理来消除材料的内应力,同时提高材料基体硬度;最终热处理一般采用高频淬火或真空淬火以达到螺纹滚道要求的最终硬度HRC58~62;最后采用低温时效处理来消除内外圆磨削后零件的表面应力。

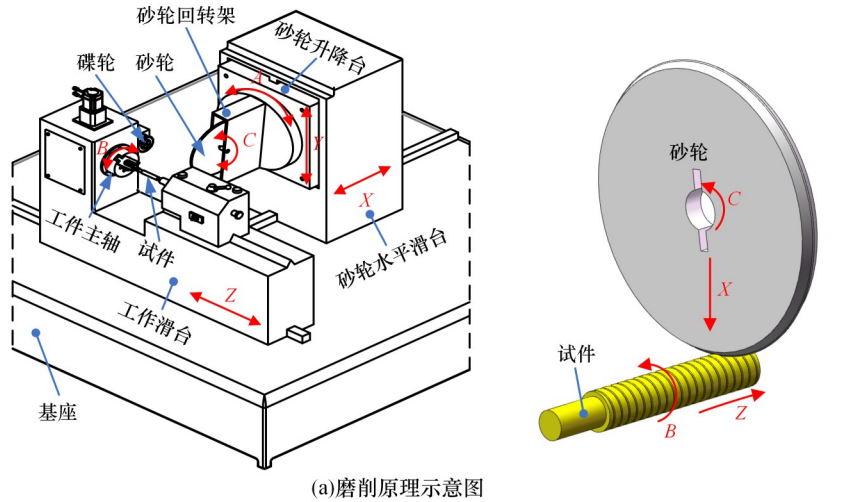
螺纹磨削原理如图3a所示,试件绕工件主轴B轴做低速回转运动并随工作滑台沿Z轴做轴向进给运动。砂轮绕砂轮电主轴C轴做高速回转运动并随砂轮水平滑台沿X轴径向进给;砂轮回转架带动砂轮绕A轴摆动形成试件的螺旋升角。试件和砂轮在机床内的耦合运动使内外螺旋面得以生成。螺纹磨床常见内部结构图见图3b、图3c,由于螺母内螺纹成形的特点,砂轮通过磨杆与砂轮电主轴连接进行内螺纹的加工。国内PRSM螺纹磨削过程一般分为4个阶段:粗磨阶段快速去除大部分余量;在半精磨阶段达到一定的加工精度并留出加工余量;经过精磨后,试件已接近最终的加工精度;最后通过终磨达到试件图纸要求的加工精度和表面质量。

## 2 PRSM 螺纹加工精度检测与评价

基于精密检测设备对螺纹加工精度进行检测及评价有助于磨削工艺的针对性优化,进而有效提高螺纹加工精度。首先采用高精度三坐标测量机接触式检测方法获取PRSM螺纹廓形表面点集,然后采用梯度阈值法、坐标变换等方法对原始点集进行坏点剔除、轴线矫正及轴法转换等预处理,最后采用最小二乘法对螺纹点集进行廓形拟合并参考现有标准对螺纹加工误差进行评价,为后续螺纹加工误差的统计、对比分析提供可靠的数据来源。

### 2.1 PRSM 螺纹廓形获取与拟合

图4所示为高精度三坐标测量机,型号为Leitz PMM-C,其光栅分辨率达0.004 μm,主要部件为机床主轴、测针库、标准球、控制器、操作面板、工作转台等。对于PRSM,丝杠、滚柱两端光轴及螺母外圆面为加工基准,在实际检测中也以



(a)磨削原理示意图

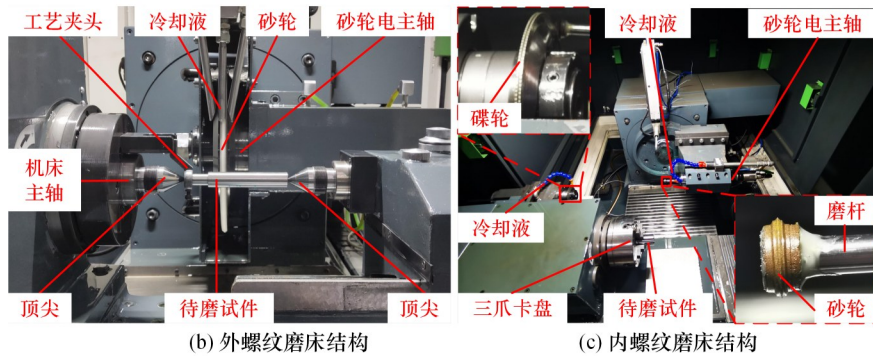


图3 磨削原理及外、内螺纹磨床结构

Fig.3 Principle of grinding and structure of external and internal thread grinding machines

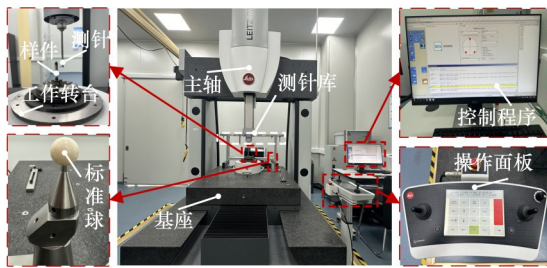


图4 高精度三坐标测量机

Fig.4 High precision coordinate measuring machine

此为检测基准建立样件坐标系。为保证测量的准确性,统一选用测头半径0.1 mm的针形测针作为扫描测针。设置扫描速度为0.5 mm/s,采样密度为0.5 μm,控制工作转台旋转分别完成0°、90°、180°、270°截面廓形的扫描,扫描路径如图5所示。

三坐标测量机扫描得到螺纹廓形点集  $A_i(x_i, y_i, z_i)$  后,采用梯度阈值法对牙顶、牙侧及牙底点集进行区域划分<sup>[26]</sup>,梯度阈值计算公式为

$$S_i = \frac{\tan(90^\circ - \alpha/2)}{2} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为螺纹牙型角;  $S_i$  为梯度阈值。

依次求取相邻两点间梯度值,比较梯度值  $S_i$  与梯度阈值  $S_i$  的关系,并将其存入对应区域数

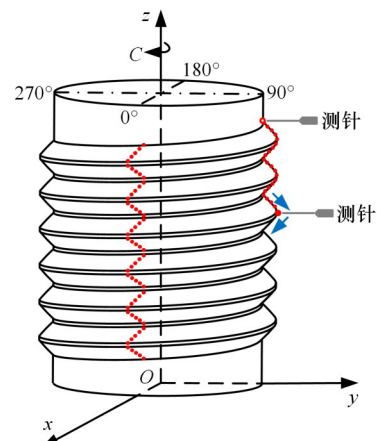


图5 扫描路径示意图

Fig.5 Scan path diagram

据内:

$$\left. \begin{aligned} L_{top} &= \{ A_i | -S_i < S_i < S_i, z_i > d_{des} \} \\ L_{left} &= \{ A_i | S_i > S_i \} \\ L_{right} &= \{ A_i | S_i < S_i \} \\ L_{bot} &= \{ A_i | -S_i < S_i < S_i, z_i < d_{des} \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $L_{top}$  为牙顶数据集;  $L_{left}$  为左牙侧数据集;  $L_{right}$  为右牙侧数据集;  $L_{bot}$  为牙底数据集;  $d_{des}$  为理论设计直径。

由于零件存在加工及安装误差等,实测螺纹廓形点集拟合得到的上下直线并不平行,故需要

对其进行矫正。基于最小二乘法对上下侧牙顶进行拟合得到上下侧廓形直线分别为  $l_1$ 、 $l_b$ ，记上下侧廓形线之间的角平分线与轴线夹角为  $\gamma$ ，将点集绕轴线旋转  $\gamma$  即可得到矫正后的点集  $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ ：

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma) & -\sin(-\gamma) \\ \sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

此外，由三坐标测量机扫描得到的螺纹廓形为轴向廓形，而设计齿廓为法向廓形，因此，需要对得到的点集进行轴法转换以便于后续处理与评价<sup>[27]</sup>。对于轴向齿廓点集  $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ ，以牙顶中点为基准旋转导程角之后得到其对应于法向齿廓的点集  $A''_i(x''_i, y''_i, z''_i)$ ：

$$\begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $\lambda$ 为导程角。

为了对螺纹特征参数进行评价，需要将处理后的实测点云拟合为曲线。基于三次样条对螺纹廓形点云进行最小二乘法拟合<sup>[28]</sup>具有较高的拟合精度和收敛性，在精密检测领域<sup>[29-30]</sup>中得到较为广泛的应用，其原理为：假设给定一组数据点集  $P(x, y)$ ， $P$ 内各数据点  $P_i(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, n)$ 来自一个三次多项式：

$$f(x_i) = \theta_0 x_i^3 + \theta_1 x_i^2 + \theta_2 x_i + \theta_3 \quad (5)$$

式中： $\theta_j(j=0, 1, 2, 3)$ 为三次多项式各项系数。

则数据集内各数据点的误差平方和  $s$  为

$$s = \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|^2 \quad (6)$$

存在一个最优三次多项式，其各项系数  $\theta_j$  使误差平方和  $s$  取极小值，此时  $s$  对  $\theta_j$  的偏导数满足：

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial \theta_j} &= \frac{\partial \sum_{i=1}^n |f(x_i) - y_i|^2}{\partial \theta_j} = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial [( \theta_0 x_i^3 + \theta_1 x_i^2 + \theta_2 x_i + \theta_3 - y_i )^2]}{\partial \theta_j} = \\ &= \sum_{i=1}^n [2(\theta_0 x_i^3 + \theta_1 x_i^2 + \theta_2 x_i + \theta_3 - y_i) x_i^j] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

进一步得到

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (\theta_0 x_i^{j+3} + \theta_1 x_i^{j+2} + \theta_2 x_i^{j+1} + \theta_3 x_i^j) = \\ & \theta_0 \sum_{i=1}^n x_i^{j+3} + \theta_1 \sum_{i=1}^n x_i^{j+2} + \theta_2 \sum_{i=1}^n x_i^{j+1} + \theta_3 \sum_{i=1}^n x_i^j = \\ & \sum_{i=1}^n (x_i^j y_i) \end{aligned} \quad (8)$$

将  $j=0, 1, 2, 3$  分别代入式(8)并转化为

矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_3 \\ \theta_2 \\ \theta_1 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^3 y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i y_i) \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix}$$

则有

$$X\theta = Y \quad (10)$$

由此得

$$\theta = X^{-1}Y \quad (11)$$

通过三坐标测量机扫描得到螺纹廓形点集后，以各个螺纹牙牙侧廓形点集构造矩阵  $X$  和向量  $Y$  后，由式(11)可解得对应最优三次多项式的系数向量  $\theta$ ，即可得到螺纹牙牙侧廓形线拟合的三次多项式。

拟合前后的点云、廓形线及拟合精度如图6所示，拟合误差控制在  $10^{-4}$  mm 数量级，误差平方和为  $3.9 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>，能够满足 PRSM 精密检测评价要求。

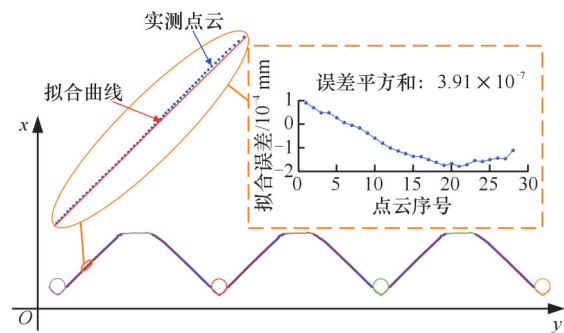


图6 螺纹廓形拟合精度示意图

Fig.6 Thread profile fitting accuracy schematic

## 2.2 PRSM 螺纹加工误差评价

### 2.2.1 螺纹中径误差

螺纹中径是 PRSM 的关键设计参数，中径误差不仅可能导致螺纹间的干涉，进而使旋转过程中发生卡滞现象甚至导致整机无法进行装配，还会导致轴向间隙、啮合位置、刚度等发生变化，从而影响整机的行程精度及承载能力。此外，中径误差也会通过影响螺旋升角进一步对传动效率造

成影响<sup>[31]</sup>,因此,在PRSM的加工误差中应重点关注。

螺纹中径定义在轴向上,指一个假想圆柱的直径,该假想圆柱母线通过螺纹上牙厚等于牙槽宽的位置<sup>[32]</sup>。螺纹中径误差的评价如图7a所示,由实际廓形线按照螺纹中径定义确定的实际螺纹中径与理论廓形螺纹中径之间的偏差即螺纹中径误差记为 $\Delta d_{Xi}$ ,其中 $X=S,R,N$ 分别表示丝杠、滚柱与螺母, $i=1,2,\dots,n$ 表示沿轴向的螺纹牙序号。

2.2.2 螺纹螺距及累积螺距误差

螺距误差和累积螺距会导致滚柱沿丝杠螺纹轴向移动时其实际位移与理论位移发生偏差从而造成行程误差<sup>[23]</sup>,还会导致各个螺纹牙的承载规律发生变化,从而加速个别螺纹牙的磨损,进一步影响承载能力及使用寿命。同时,螺距误差也会造成螺旋升角发生变化,进而影响传动效率<sup>[31]</sup>。

如图7b所示,螺纹螺距定义为相邻两牙体上对应牙侧与中径线相交两点间的轴向距离,由实际廓形线计算得到的实际螺距与理论螺距之间的偏差即螺距误差记为 $\Delta p_{Xi}$ 。累积螺距误差为在规定的螺纹长度内,任意两牙体间的实际累积螺距与其理论累积螺距之差中绝对值最大的偏差<sup>[32]</sup>,记为 $\Delta p_{\Sigma Xi}$ ,实际评价中以各个试件的实测有效螺纹长度作为其累积螺距误差评价长度。

2.2.3 螺纹偏心误差

螺纹偏心误差是影响整机运行平稳性及行程精度的重要因素,且丝杠与螺母偏心误差的叠加效应将加剧载荷分布不均匀性<sup>[18]</sup>,使得部分螺纹牙快速磨损,从而影响整机的承载能力、传动效率及使用寿命。

如图7c所示,在螺纹廓形扫描前已经由工件精密加工表面确定了工件的旋转轴线并以此建立了样件坐标系 $Oxy$ ,控制工作转台旋转并测量工作转台角度分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时被测件的四条轴向螺纹廓形,可以由此确定螺纹轴线中心点 $O'$ , $O$ 与 $O'$ 间的距离即螺纹的偏心误差,记为 $\epsilon_{Xi}$ 。

2.2.4 螺纹牙型角误差

在PRSM啮合传动过程中,螺纹啮合位置及最大接触应力会随螺纹牙型角误差大小而改变,影响整机承载稳定性、承载能力及使用寿命。此外,牙型角误差会影响两侧的接触角进而影响整机传动效率<sup>[31]</sup>,且左右牙型角的不一致会导致PRSM在正反转时的传动精度产生差异。

如图7d所示,在螺纹中径位置得到螺纹牙左右两侧两交点处廓形曲线的切线,两侧切线与理论 $45^\circ$ 直线的夹角即为牙型角误差,左右牙型角误差分别记为 $\Delta\beta_{XLi}, \Delta\beta_{XRi}$ 。

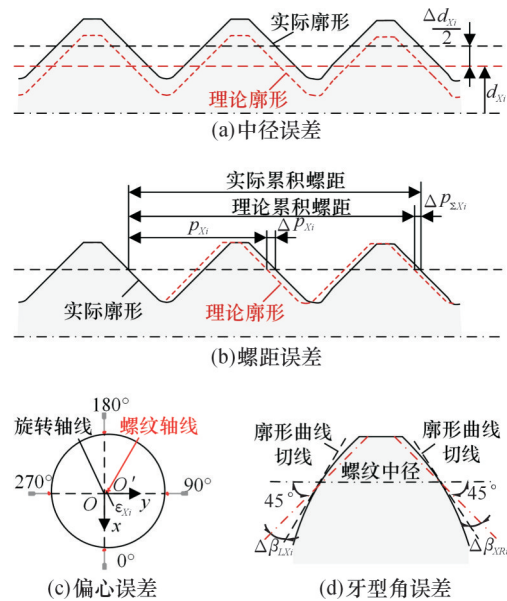


图7 螺纹加工误差评价示意图

Fig.7 Schematic diagram of thread machining error evaluation

根据上述PRSM螺纹廓形检测及评价方法对5款样机的丝杠、滚柱及螺母总计61个零件的 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四个方向的轴向廓形进行检测,总计得到244条轴向螺纹廓形点集数据。其中,丝杠 $0^\circ \sim 180^\circ$ 截面内轴向齿廓评价结果如图8所示,得到沿轴向的 $i$ 个中径数据 $d_{Si}$ , $2i$ 个螺距数据 $P_{Si}$ , $4i$ 个左右牙型角数据 $\beta_{SLi}, \beta_{SRi}$ ,进而根据理论值得到对应的螺纹中径误差、螺距误差、牙型角误差,偏心误差根据 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四条轴向廓形数据计算得到。

得到误差数据后,基于核密度估计来计算数据的经验分布,并绘制其分布曲线。由于当数据形成偏态分布时,四分位间距方法最适合检验并判断异常值,故以1.5倍IQR值来确定数据集中正常值的范围。同时为了消除异常值的影响,以各组数据的中位数代表该项误差整体水平。

3 结果与讨论

3.1 螺纹中径误差

图9a、图9b分别为国内外各样机丝杠及螺母的螺纹中径误差分布图,图中横坐标表示不同样机及不同截面,纵坐标表示零件中径误差值。由图9a可以看出,国外GSA样机丝杠中径误差为 $-5.6 \mu m$ ,其误差带宽最小,为 $4 \mu m$ ,整体数据分

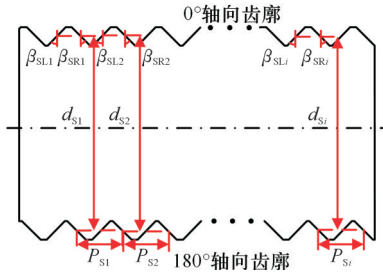
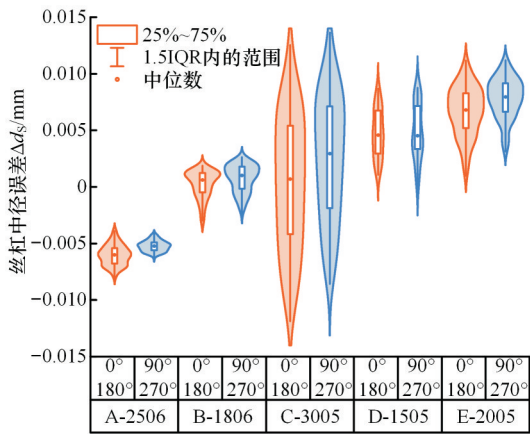


图8 丝杠轴向齿廓评价

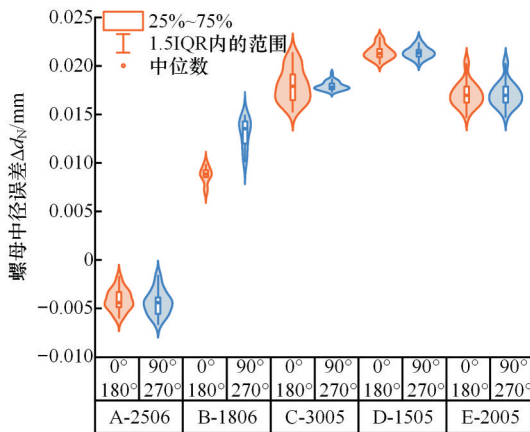
Fig.8 Evaluation of screw axial tooth profile

布形态近似于正态分布；国产B-1806样机丝杠中径误差最小，为0.8 μm，整体分布形态为负偏态分布，其丝杠中径普遍偏大。此外，国产样机丝杠中径误差带宽一般为国外样机的2倍以上，最大为C-3005样机，其中径误差带宽最大达24.3 μm。

由图9b可以看出，国外GSA样机螺母中径误差为-4 μm，误差带宽为5 μm，整体数据分布形态近似正态分布，与丝杠相比，GSA样机螺母中径控制水平趋于一致。国内样机螺母中径误差带宽可与GSA样机保持近似水平，但本文所检测国内样机螺母中径误差大部分在10 μm以上，其中D-1505样机螺母中径误差达21 μm，差距显



(a)丝杠中径误差分布



(b)螺母中径误差分布

图9 丝杠、螺母中径误差分布

Fig.9 Screw, nut pitch diameter error distribution

著。相较于丝杠，国内产品螺母中径误差更大，这表明国内PRSM内螺纹加工能力较弱。从丝杠及螺母不同截面的检测数据来看，两截面数据基本保持近似的分布形态且整体水平相近，而B-1806样机螺母两截面中径相差4 μm左右，其原因可能是该螺母内圆圆度存在较大偏差。

图10所示为滚柱的中径误差分布，横坐标表示各样机的不同滚柱，纵坐标表示各样机滚柱中径误差。可以看出，GSA组间滚柱中径误差范围为[-0.46, 1.7] μm，单滚柱中径误差带宽最大为3 μm，大部分滚柱中径误差近似正态分布，部分滚柱呈现一定的负偏态分布。国内样机中，B-1806组间滚柱中径误差范围为[0.83, 2.3] μm，单滚柱中径误差带宽最大为2.6 μm，与GSA水平相近。其余国内样机组间及单滚柱中径误差范围普遍在5 μm以上，E-2005组间滚柱中径误差范围最大，为[-9.6, -2.5] μm，C-1505单滚柱中径误差带宽最大，为13.5 μm。相较于同为外螺纹的丝杠，滚柱中径的加工精度较差，其原因在于滚柱本身小螺距短圆弧硬廓面的特点导致其加工难度更大。

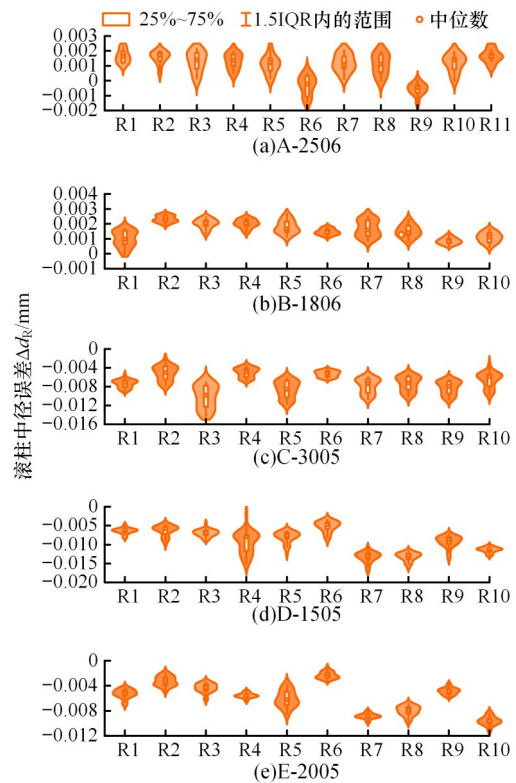


图10 各样机滚柱中径误差分布

Fig.10 Roller pitch diameter error distribution of each prototype

由于滚柱的数量通常较多，故滚柱组间加工质量的一致性更为重要，滚柱中径一致性较差会

导致样机运行不平稳、性能不稳定,严重时甚至会导致样机卡滞。方差表征一组数据的波动情况,因此,可用滚柱组间中径误差的方差来评价该组滚柱的一致性。以中径误差中位数作为该滚柱整体水平,计算各样机滚柱组间中径误差的方差 $S^2$ :

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum (X - \mu)^2 \quad (12)$$

式中: $X$ 为各滚柱中径误差; $\mu$ 为各组滚柱中径误差均值; $N$ 为各组滚柱个数。

各样机滚柱组间中径误差方差如图11所示,可以看出,国内B-1806样机滚柱方差最小,其滚柱中径一致性最好,其次为GSA样机,国内D-1505样机滚柱一致性最差。

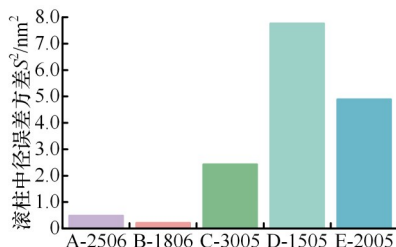


图11 各样机滚柱中径误差方差

Fig.11 Roller pitch diameter error variance of each prototype

进一步以加工起始端为起点,绘制A-2506、B-1806、E-2005样机丝杠 $0^\circ \sim 180^\circ$ 截面内中径沿轴向的变化图,如图12所示。可以看出,A-2506及E-2005样机丝杠的中径均表现出一定的锥度,中径变化值分别为 $4 \mu m$ 、 $10 \mu m$ 。这是由于在进行螺纹磨削时,随着丝杠的轴向移动,作为刀具的砂轮不断且不可避免地发生磨损,导致远离加工起始端的螺纹牙高逐渐变小,进而导致螺纹中径变大而呈现锥度现象,如图13a所示。而B-1806丝杠中径从加工起始端到加工末端呈现先变大后变小的“鼓形”趋势,这是由于砂轮沿X轴进给进行磨削时,丝杠会受到径向磨削力,径向磨削力过大会导致丝杠发生弯曲变形,此时丝杠将远离砂轮致使实际磨削深度变小,即实际螺纹牙高变小从而使螺纹中径变大。而在机床两顶尖的支撑下,丝杠中段的支承刚度最小,因此,中段最易发生弯曲变形导致丝杠中段的螺纹中径大于两端螺纹中径,从而使丝杠中径沿轴向呈现“鼓形”,如图13b所示。

中径作为PRSM的关键几何参数,对整机的啮合接触、传动精度等有重要影响,因此,需要尽可能地提高中径的加工精度并减小磨削锥度,在

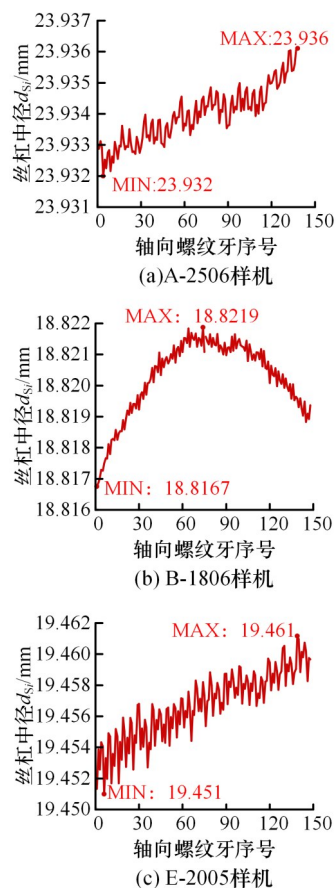


图12 丝杠中径沿轴向变化趋势

Fig.12 The change trend of the pitch diameter of the screw along the axial direction

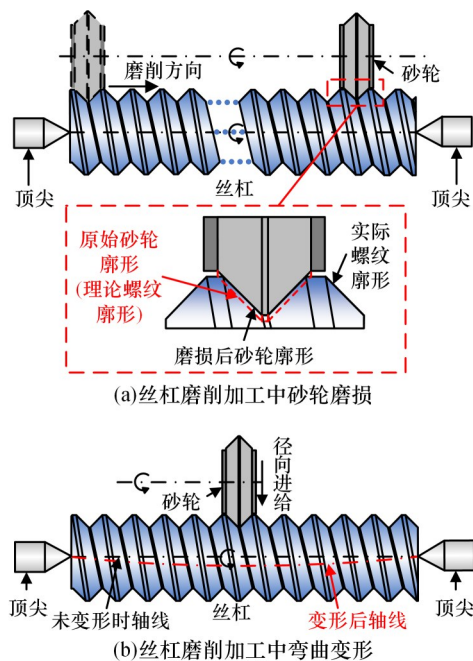


图13 丝杠中径锥度及锥度异常产生原因  
Fig.13 Causes of abnormal taper and taper of middle diameter of screw

实际加工中可采取以下措施:①选择合适的砂轮材质以减小砂轮在磨削过程中的磨损并保持良好

的自锐性；②勤修砂轮以保持砂轮在磨削时廓形精度；③采用多线砂轮进行多头螺纹的磨削，避免单线砂轮的过度磨损导致中径产生锥度；④终磨完成之后保持磨削进给量不变再次进行磨削；⑤优化磨削工艺参数，适当减小磨削进给量，防止试件因径向磨削力过大发生弯曲变形；⑥对于较长的丝杠，可在磨削中添加必要的辅助支撑以提高支承刚度。

### 3.2 螺纹螺距误差及累积螺距误差

图 14 所示为丝杠和螺母的螺距误差分布，可以看出 GSA 及国内 B-1806 样机丝杠螺距误差均保持在  $\pm 1 \mu\text{m}$  以内，整体趋于零误差，但 GSA 样机螺距误差近似正态分布，B-1806 样机丝杠螺距误差分布为双峰分布。尽管国内其他样机丝杠螺距误差同样接近无误差，但其误差带宽普遍为 GSA 样机的 3 倍以上，最大为 C-3005 样机，其螺距误差范围为  $[-6, 5] \mu\text{m}$ 。此外，国内样机丝杠螺距误差具有一定的异常点，其分布形态趋向于双峰分布。与丝杠相比，各样机螺母的螺距误差较大，GSA 样机螺母螺距误差范围为  $[0.3, 2.4] \mu\text{m}$ ，整体分布近似正态分布。国内样机螺母螺距误差范围则偏大，普遍在  $[-2, 2] \mu\text{m}$  范围内，个别样机螺母螺距误差分布趋向于双峰分布。

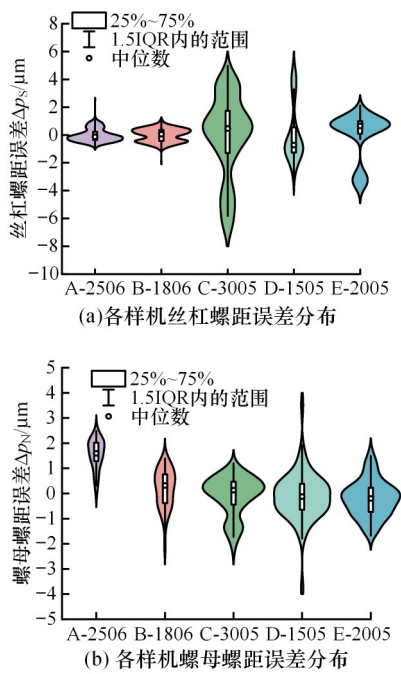


图 14 丝杠、螺母螺距误差分布  
Fig.14 Screw, nut pitch error distribution

以 5 款样机的丝杠为例，沿  $0^\circ$  轴向齿廓绘制前 20 颗螺纹牙的螺距变化图，如图 15 所示。可以看出，轴向螺纹牙螺距以头数为周期发生明显的周期性波动，具体表现为每 5 颗螺纹牙中某颗

螺纹牙相比其他螺纹牙螺距显著增大或减小，而相邻螺纹牙的螺距则显著减小或增大。从波动来看，国外 GSA 产品螺距波动最小，C-3005、D-1505、E-2005 样机丝杠螺距波动大于 B-1806 样机，且均大于 GSA 样机。由于螺距的周期性波动，当波动变化较大时，部分螺纹牙的螺距会显著偏离整体水平成为异常点，导致其分布形态为双峰分布。

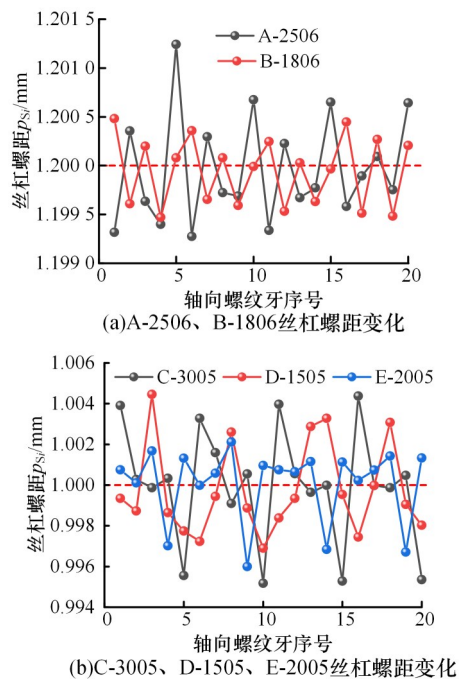


图 15 沿轴向丝杠螺距变化趋势  
Fig.15 Variation trend of screw pitch along the axial direction

如图 16 所示，当多头螺纹在加工时存在一定的分度误差时，会导致实际螺旋线偏离理论螺旋线的位置，反映至轴向上则表现为存在分度误差的螺纹滚道将发生向左或向右的平移，该螺纹滚道的左右螺纹牙螺距将在此处发生突变，致使螺距以螺纹头数为周期发生周期性波动，波动量越大则说明该机床分度误差越严重。

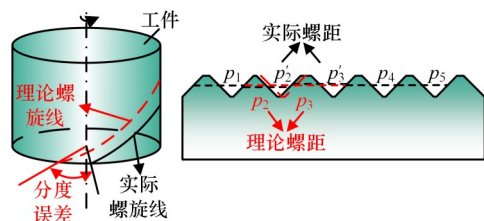


图 16 分度误差示意图  
Fig.16 Indexing error diagram

影响螺距误差的因素主要有静态、动态及随机误差三类<sup>[33]</sup>。静态误差是由机床本身的几何误差和传动误差造成的，主要有机床母丝杠的螺距

误差及轴向窜动、工作滑台移动的不均匀性误差等。动态误差为磨削过程中产生的误差,随加工系统及工艺变化,主要包括工件、机床母丝杠的热变形、砂轮与滚道之间的接触变形及砂轮的磨损等。随机误差则为外部环境变化及振动干扰产生的误差。所以应提高机床本身及圆、直光栅的精度,合理选择砂轮材质以减小砂轮磨损,优化磨削工艺参数以减小磨削变形等。

图17所示为各样机滚柱的螺距误差分布,结果表明螺距误差均近似均值为0的正态分布,国外GSA样机A-2506、国内样机B1806、C-3005滚柱螺距加工误差基本控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 内,D-1505、E-2005滚柱螺距加工误差基本控制在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 内,说明国内外加工水平相近,滚柱螺距均具有较高的加工质量与较好的一致性。

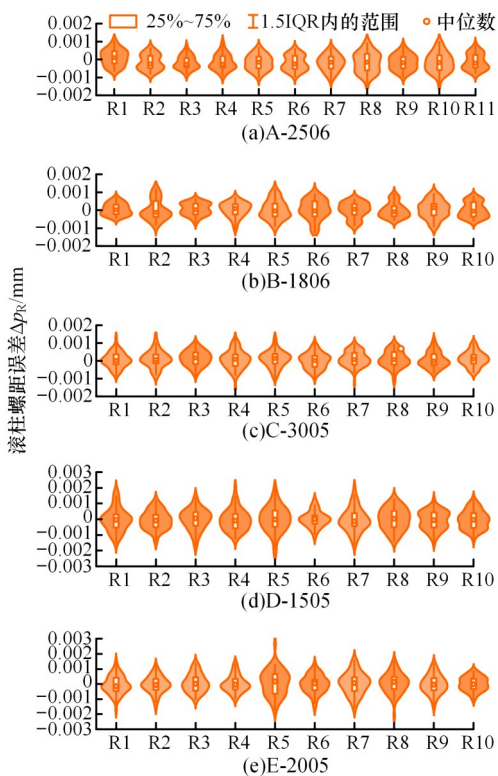


图17 各样机滚柱螺距误差分布

Fig.17 Roller pitch error distribution of each prototype

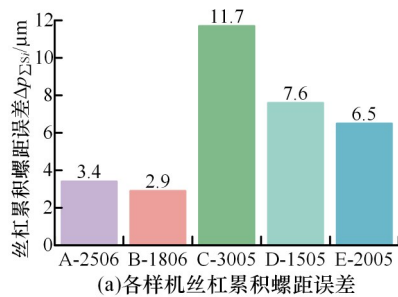
各样机丝杠、螺母及滚柱的有效测量长度见表3,图18、图19所示为丝杠与螺母、滚柱在其有效测量长度内的累积螺距误差。可以看出,国外GSA样机丝杠、螺母及滚柱的累积螺距误差分别为3.4、1.0、1.7  $\mu\text{m}$ 。国内样机中,B-1806累积螺距误差与GSA水平最为接近,丝杠、螺母及滚柱的累积螺距误差分别为2.9、3.3、1.5  $\mu\text{m}$ ,而国内其余样机丝杠、滚柱、螺母的累积螺距误差普遍在6、3、3  $\mu\text{m}$ 以上,与GSA样机相比存在一定差距。

其中,C-3005样机丝杠及滚柱、D-1505螺母及滚柱累积螺距误差显著较大,其原因可能在于机床本身精度不足、床身导轨存在一定的倾斜或磨削过程中工件的热变形较大等,对此应进一步检测并提高机床本身及传动链精度,保证加工时工件与机床的温度一致并对机床进行预热,以小磨削进给量进给并保证良好的润滑与冷却。

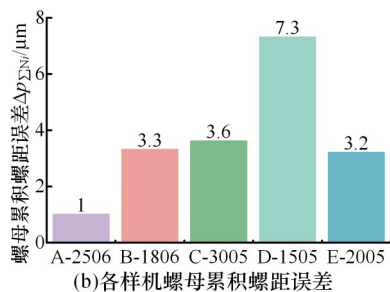
表3 各样机丝杠、螺母及滚柱的有效测量长度

Tab.3 Effective measurement length of screw, nut and roller of each prototype mm

样机	丝杠	滚柱	螺母
A-2506	168.0	32.4	32.4
B-1806	178.8	13.2	13.2
C-3005	124	34	34
D-1505	70	29	29
E-2005	150	32	32



(a)各样机丝杠累积螺距误差



(b)各样机螺母累积螺距误差

图18 丝杠、螺母累积螺距误差

Fig.18 Cumulative pitch error of screw and nut

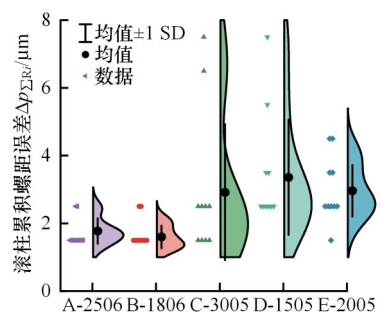


图19 各样机滚柱累积螺距误差分布

Fig.19 Cumulative pitch error distribution of rollers of each prototype

### 3.3 螺纹偏心误差

图20为丝杠和螺母的偏心误差分布图。可

以看出,GSA样机丝杠偏心误差为 $0.8\ \mu\text{m}$ ,其误差带宽最小,为 $1.5\ \mu\text{m}$ ,整体数据分布形态近似正态分布。国产样机丝杠偏心误差均在 $2.2\ \mu\text{m}$ 以上,最大为D-1505样机,偏心误差达 $14.6\ \mu\text{m}$ ,国内样机丝杠偏心误差带宽普遍为GSA的3倍以上,且整体分布形态为偏态分布。国外GSA样机螺母偏心误差为 $5.5\ \mu\text{m}$ ,误差带宽为 $2.4\ \mu\text{m}$ ,整体数据分布形态为负偏态分布,与丝杠相比,GSA样机螺母偏心误差控制较差。国内部分样机螺母偏心误差可控制在 $3\ \mu\text{m}$ 内,误差带宽与GSA样机保持相近水平,但D-1505样机螺母偏心误差较大,达 $21\ \mu\text{m}$ 。由于内螺纹的加工难度更大,国内外螺母的偏心误差整体水平及误差带宽均要高于丝杠。

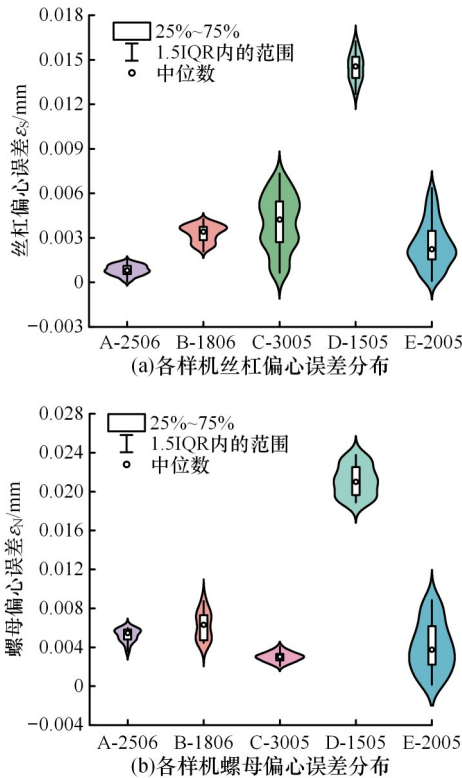


图20 丝杠、螺母偏心误差分布  
Fig.20 Screw, nut eccentric error distribution

D-1505样机丝杠及螺母的偏心误差水平均高于其他型号样机,如图21、图22所示,其原因可能在于丝杠两端中心孔的研磨精度不足导致左右两端中心孔不同心或机床上两顶尖不同心。内螺纹在加工时,砂轮磨杆呈细长悬臂梁状态,且由于转速较高易发生由磨杆刚度不足导致的磨杆颤振现象,进而导致内螺纹整体加工精度下降并加速砂轮的磨损。

图23为各样机滚柱偏心误差分布图,可以看出,GSA样机单滚柱偏心误差最大值为 $3.3\ \mu\text{m}$ ,

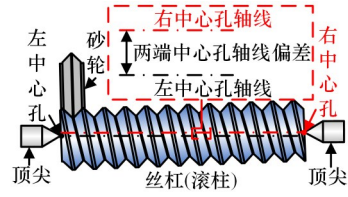


图21 中心孔精度不足示意图  
Fig.21 Insufficient accuracy of center hole schematic diagram

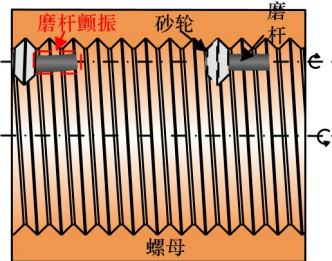


图22 内螺纹磨削砂轮磨杆颤振示意图  
Fig.22 Inner thread grinding wheel grinding rod chatter diagram

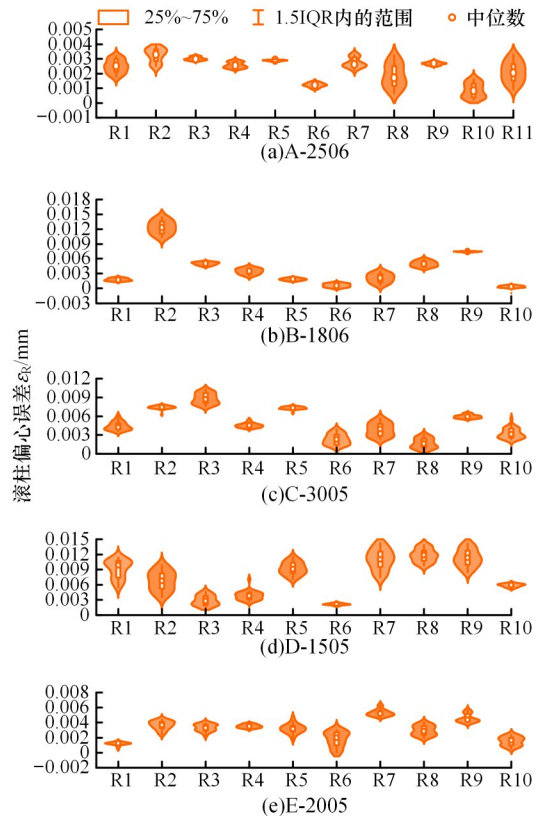


图23 各样机滚柱偏心误差分布  
Fig.23 Roller eccentricity error distribution of each prototype

单滚柱偏心误差最大带宽为 $2.6\ \mu\text{m}$ ,且各个滚柱之间偏心误差差距较小,基本保持在 $2\ \mu\text{m}$ 以内。而国内样机滚柱偏心误差普遍在 $5.2\ \mu\text{m}$ 以上,单滚柱偏心误差最大带宽均大于 $3\ \mu\text{m}$ ,各个滚柱之间偏心误差差距较大。各样机滚柱的偏心误差方

差结果如图24所示,可以看出,GSA样机滚柱偏心误差方差最小,滚柱具有较好的一致性,而国内B-1806、C-3005及D-1505样机滚柱偏心误差方差较大,滚柱的一致性较差。

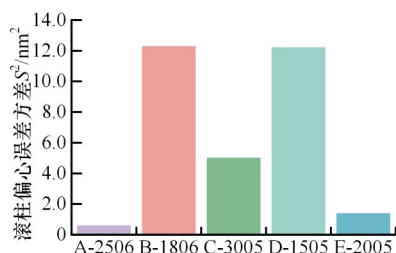


图24 各样机滚柱偏心误差方差

Fig.24 Roller eccentricity error variance of each prototype

此外,滚柱作为外螺纹部件其偏心误差较丝杠更高,其原因在于滚柱直径较小且滚柱加工时需要留出工艺端用于夹持,工艺端过长会使滚柱的刚性降低,当两顶尖的顶尖力过大或径向磨削力过大时都会导致滚柱发生变形进而产生较大的偏心误差。

为了进一步控制偏心误差,可采取以下措施:①使用专用的中心孔研磨机以提高丝杠及滚柱两端中心孔的加工精度;②检测并调整机床两顶尖的同轴情况;③进行螺纹磨削前确保试件本身的内外圆跳动符合试件图纸公差要求;④试件安装到磨床上后检测其跳动值并调整至加工允许范围;⑤在进行大长径比内螺纹磨削时采用性能较好的磨杆材料如Ti合金、硬质合金和新型陶瓷等<sup>[34]</sup>,在磨杆中添加阻尼器或适当优化磨削工艺参数;⑥保证正常磨削且不发生干涉的前提下尽量减小滚柱的工艺端长度,并适当减小两端的顶尖力。

### 3.4 螺纹牙型角误差

图25为丝杠、螺母牙型角误差分布图。可以看出,国外GSA样机丝杠牙型角误差近乎0误差,其牙型角误差范围为 $[-0.2^{\circ}, 0.2^{\circ}]$ ,总体近似正态分布。国内样机丝杠牙型角误差可保持在 $0^{\circ}$ 附近,但误差带宽普遍在 $0.5^{\circ}$ 以上,均大于GSA样机,其中E-2005样机数据为明显的双峰分布且整体数据存在缺口。国外GSA样机螺母牙型角误差为 $0.1^{\circ}$ ,误差范围为 $[-0.1^{\circ}, 0.2^{\circ}]$ ,数据分布表现为负偏态分布。而国内样机螺母牙型角误差可与GSA样机保持相近水平,但误差带宽普遍在 $0.5^{\circ}$ 以上,均大于GSA样机。从数据分布形态来看,国内样机螺母牙型角误差数据大多为双峰分布,且C-3005样机数据存在缺口,而D-1505样机

近似正态分布,但存在较大的异常值。

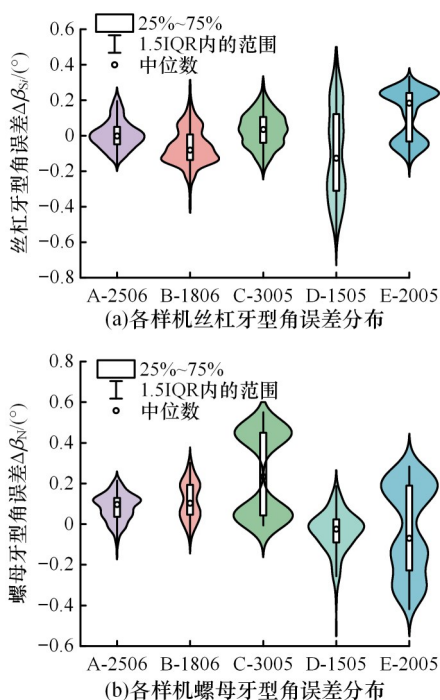


图25 丝杠、螺母牙型角误差分布

Fig.25 Screw, nut, tooth angle error distribution

如图26所示,统计C-3005样机螺母 $0-180^{\circ}$ 截面沿轴向20颗螺纹牙的左右牙型角的变化,发现左侧牙型角均大于右侧牙型角,左右侧牙型角差值在 $0.4^{\circ}$ 左右。其原因在于在磨削过程中砂轮与工件沿轴向的相互运动导致左右螺旋面受到的磨削力不同、砂轮与工件接触产生的变形不同,进而导致两侧螺旋面的磨削情况存在差异,致使一边螺旋面的牙型角总是大于另一边。

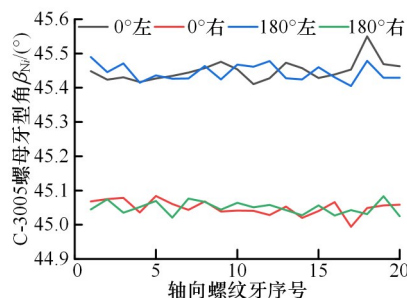


图26 C-3005样机螺母 $0-180^{\circ}$ 截面牙型角变化

Fig.26 The change of tooth angle of  $0-180^{\circ}$  section of C-3005 prototype nut

图27为各样机滚柱的牙型角误差分布示意图,可以发现,相较于丝杠和螺母,滚柱的牙型角整体误差水平及误差带宽均大于丝杠、螺母,原因在于滚柱本身小螺距硬廓面凸圆弧的特点,其加工更为困难,故其牙型角精度偏低。国外GSA样机各个滚柱牙型角误差在 $0^{\circ}$ 左右,单滚柱牙型角最大误差范围为 $[-0.3^{\circ}, 0.9^{\circ}]$ ,大部分牙型角误

差数据分布形态为双峰分布且数据存在缺口。国内 B-1806 样机滚柱牙型角误差数据分布近似正态分布,但其滚柱牙型角误差最大,为 1.85°。C-3005 样机各个滚柱牙型角误差在 0.6°左右,单滚柱牙型角最大误差范围为 [0.1°, 1.0°]。国内 D-1505、E-2005 样机滚柱牙型角误差均大于 GSA 样机,且牙型角误差范围普遍在 1.5°以上。

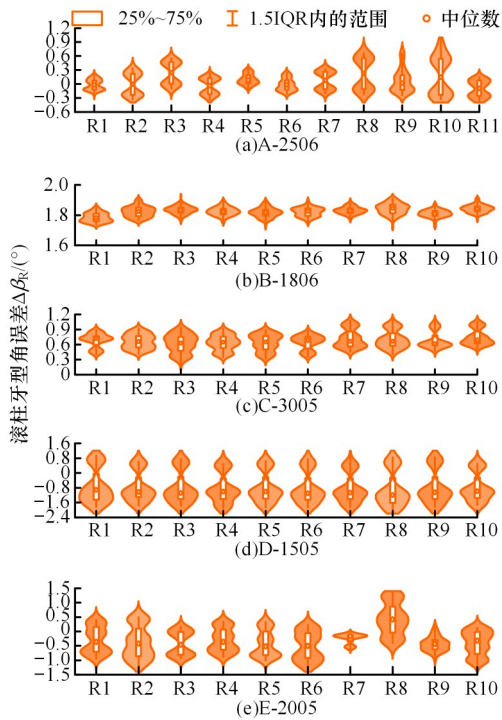


图 27 各样机滚柱牙型角误差分布

Fig.27 Roller tooth angle error distribution of each prototype

D-1505 样机滚柱牙型角均为存在数据缺口的双峰分布,说明其加工过程中,左右螺旋面受到的磨削力存在较大差距。E-2005 同样表现为双峰分布甚至三峰分布,说明左右螺旋面磨削力存在一定差距且整个磨削过程中磨削力较不稳定。对此,可以通过小磨削进给量进行磨削来改善磨削力的大小,进一步对牙型角进行调控。

在螺纹磨削中,螺纹的廓形是由砂轮的截形及运动决定的,因此砂轮的截形设计将直接影响螺纹的加工精度<sup>[35]</sup>。对于 PRSM 精密螺纹,可以采用解析法并借助计算机辅助求解砂轮的廓形点云,将砂轮的廓形点云输入至磨床以得到精确的砂轮截形,可以大幅提高螺纹加工质量。此外,砂轮的修整方式直接决定了砂轮的截形精度,使用金刚石滚轮修整砂轮具有较高的修整精度,为了保证砂轮的截形精度,应采用该方法对砂轮进行修整。在加工过程中,砂轮会发生磨损,可以在磨削过程中对工件进行在线或离线检测,根据检测

结果对砂轮进行反调修正以保证螺纹的加工精度。另外,砂轮的自锐性对螺纹的加工精度也有显著影响,应选取具有良好自锐性的砂轮材质以保证砂轮在磨削时的截形精度。

#### 4 结论

本文选取国内外典型型号 PRSM 产品,采用高精度三坐标接触式测量方法系统地开展了螺纹中径误差、偏心误差、螺距误差及牙型角误差等加工误差的统计、分析及对比研究,阐述了目前国内外 PRSM 螺纹加工质量的差距及典型异常加工结果及其产生机理,并对螺纹加工质量调控提出了相应的工艺优化方法,为国产 PRSM 螺纹高效精密磨削与性能提升提供了支撑,具有重要的研究和工程指导意义。结论如下:

1) 国外 GSA 样机螺纹中径误差为 5  $\mu\text{m}$ ,而国内样机螺纹中径误差约为 GSA 样机的 2 倍; GSA 样机螺纹螺距误差带宽为 2  $\mu\text{m}$ ,国内产品外螺纹螺距误差与 GSA 样机相近,而内螺纹螺距误差带宽为 4  $\mu\text{m}$ ;国内样机偏心误差及误差带宽普遍为国外样机的 3 倍以上;国外样机牙型角误差范围在  $\pm 0.2^\circ$  以内,而国内样机则在  $\pm 0.3^\circ$  到  $\pm 0.4^\circ$  左右。就成组滚柱而言,国外样机滚柱具有较好的一致性,而国内部分样机的滚柱一致性则较差。

2) 不可避免的砂轮磨损导致国内外样机丝杠中径均产生一定的锥度,过大的径向磨削力使丝杠发生弯曲变形、丝杠中径呈现“鼓形”。国内样机由于机床本身及圆直光栅的精度不足导致多头螺纹产生分度误差,使得多头螺纹的螺距以头数为周期发生波动;外螺纹试件两端中心孔与机床两顶尖的同轴度不足、内螺纹磨杆的颤振导致螺纹偏心误差较大;磨削过程中,左右型面的磨削力不同导致左右牙型角产生明显差异。

3) 结合工程实际,对 PRSM 螺纹加工质量调控提出了工艺优化与改进措施:一是以小磨削进给量进行多次磨削;二是选择合适的砂轮材质以减小砂轮磨损,并勤修砂轮以保持砂轮的廓形精度;三是增大内螺纹砂轮磨杆的刚度减缓磨杆颤振;四是优化磨削工艺参数,减小磨削力、热及变形;五是提高试件两中心孔和机床顶尖的同轴度;六是检测并提高机床本身传动链精度及圆、直光栅的精度。

#### 参考文献:

[1] JONES M H, VELINSKY S A. Contact Kinemat-

- ics in the Roller Screw Mechanism [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(5):051003.
- [2] FALKNER M, NITSCHKO T, SUPPER L, et al. Roller Screw Lifetime under Oscillatory Motion; from Dry to Liquid Lubrication[C]//10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. San Sebastián, 2003:297-301.
- [3] WANDER J, BYRD V, PARKER J. Initial Disturbance Accommodating Control System Analysis for Prototype Electromechanical Space Shuttle Steering Actuator[C]//Proceedings of 1995 American Control Conference. Seattle, 1995:3961-3964.
- [4] RICHTER L, KROEMER O. Application of a Remote Controlled Hammering Drill from Space to Deep Sea [C] //OCEANS 2009-EUROPE. Bremen, 2009:1-4.
- [5] DUPONT P E. Friction Modeling in Dynamic Robot Simulation [C] //Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati, 1990:1370-1376.
- [6] ROSENBERG G, PIERCE W S, SNYDER A J, et al. The Pennsylvania State University Roller Screw Electric Total Artificial Heart: 205 Days Survival in the Calf [C]//Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Orlando, 1991:2087-2089.
- [7] STRANDGREN C B. Screw-threaded Mechanism; US2683379A[P]. 1954-07-13.
- [8] STRANDGREN C B. Nut and Screw Devices [P]. 1965.
- [9] STRANDGREN C B. Rolling on Rollers for Helical or Circular Movement; FR888281A [P]. 1942-02-27.
- [10] 靳谦忠, 杨家军, 孙健利. 行星式滚柱丝杠副的运动特性及参数选择[J]. *制造技术与机床*, 1998(5): 13-15.
- JIN Qianzhong, YANG Jiajun, SUN Jianli. Motion Characteristics and Parameters Choosing of Planetary Roller Screw [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1998(5):13-15.
- [11] 靳谦忠, 杨家军, 孙健利. 行星式滚柱丝杠副的摩擦机理研究[J]. *华中理工大学学报*, 1998, 26(6): 82-83.
- JIN Qianzhong, YANG Jiajun, SUN Jianli. The Research on Friction Mechanism of the Planetary Roller Screw [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1998, 26(6):82-83.
- [12] XU Hongwei, WEI Peitang, DU Xuesong, 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.
- [13] FANG Cui, ZHAO Yongsheng, YANG Congbin, et al. Predictive Modeling of Surface Roughness in the Inner Thread Grinding Considering the Effects Elastic Deformation [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 784(1): 012018.
- [14] ZHANG Zhaojing, DOU Yongqiang, ZHANG Rong, et al. Research on Surface Quality and Wheel Wear of Internal Thread in High-speed Grinding [C]//Proceedings of 2023 Chinese Intelligent Systems Conference. Singapore, 2023:163-173.
- [15] 徐洪伟, 魏沛堂, 周鹏亮, 等. 小螺距滚柱牙型非接触式检测与偏差评价方法[J]. *重庆大学学报*, 2023, 46(3):45-57.
- XU Hongwei, WEI Peitang, ZHOU Pengliang, et al. Non-contact Detection and Deviation Evaluation Method of Small Pitch Roller Profile [J]. *Journal of Chongqing University*, 2023, 46(3):45-57.
- [16] MAMAEV I M, MOROZOV V V, FEDOTOV O V, et al. Precision of a Roller Screw Actuator Transmission for a Radio Telescope [J]. *Russian Engineering Research*, 2015, 35(12):919-923.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] FU Xiaojun, LIU Geng, MA Shangjun, et al. A Comprehensive Contact Analysis of Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2017, 139(1):012302.
- [20] FU Xiaojun, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Kinematic Model of Planetary Roller Screw Mechanism with Run-out and Position Errors [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2018, 140(3):032301.
- [21] MA Shangjun, CAI Wei, WU Linping, et al. Modelling of Transmission Accuracy of a Planetary Roller Screw Mechanism Considering Errors and Elastic Deformations [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 134: 51-168.
- [22] MA Shangjun, WU Guanyu, ZHANG Jianxin, et al. A Comprehensive Error Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism [J]. *Advances in Me-*

- chanical Engineering, 2022, 14(5):16878132221100687.
- [23] WU Hanlin, WEI Peitang, HU Rui, et al. Study on the Relationship between Machining Errors and Transmission Accuracy of Planetary Roller Screw Mechanism Using Analytical Calculations and Machine-learning Model[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(1):398-413.
- [24] LI W, SAKAI T, LI Q, et al. Reliability Evaluation on very High Cycle Fatigue Property of GCr15 Bearing Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7):1096-1107.
- [25] UNI EN. Heat-Treatable Steels, Alloy Steels and Free-cutting Steels-Part 17: Ball and Roller Bearing Steels;ISO 683-17:2023[S]. Geneva:ISO, 2023.
- [26] 魏沛堂, 罗莉, 杜雪松, 等. 一种行星滚柱丝杠牙形和螺旋线偏差评定方法:CN118094806A[P]. 2024-05-28.
- Wei Peitang, Luo Li, Du Xuesong, et al. Evaluation Method for Tooth Form and Spiral Line Deviation of Planetary Roller Screw;CN118094806A[P]. 2024-05-28.
- [27] 王凯, 欧屹, 曾石蕾, 等. 基于激光传感器的滚珠螺母型面测量[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1):39-49.
- WANG Kai, YiOU, ZENG Shiqiang, et al. Measurement of Ball Nut Profile Using Laser Sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1):39-49.
- [28] FAN Jianqing. Local Polynomial Modelling and Its Applications: Monographs on Statistics and Applied Probability 66[M]. New York: Routledge, 1996.
- [29] 袁东明, 丁亚林, 张健. 应用分块三次多项式的导引头测角精度标定[J]. 兵工学报, 2019, 40(10):2042-2049.
- YUAN Dongming, DING Yalin, ZHANG Jian. Calibration of Seeker Angle-measuring Error with Block Three-order Polynomial[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(10):2042-2049.
- [30] 张聪, 刘文正, 段发阶, 等. 长导轨五自由度测量中直线度精度提升方法与优化设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(20):2467-2478.
- ZHANG Cong, LIU Wenzheng, DUAN Fajie, et al. Accuracy Improvement Method and Optimal Design of Straightness in Five-degree-of-freedom Measurement of Long Guide[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(20):2467-2478.
- [31] VELINSKY S A, CHU B, LASKY T A. Kinematics and Efficiency Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(1):011016.
- [32] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 螺纹术语:GB/T 14791—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014:32.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Screw Threads-Vocabulary: GB/T 14791—2013[S]. Beijing:Standards Press of China, 2014:32.
- [33] 温效朔. 精密滚珠丝杠磨削加工误差分析及其补偿控制[D]. 济南:山东大学, 2005.
- WEN Xiaoshuo. Error Analysis of Precision Ball Screw Grinding and Its Compensation Control[D]. Jinan:Shandong University, 2005.
- [34] 李帅, 吴贵成, 安玉全, 等. 内螺纹精密磨削加工技术综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7):72-80.
- LI Shuai, WU Guicheng, AN Yuquan, et al. Review on Precision Grinding of Internal Threads[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7):72-80.
- [35] 范东风. 大导程滚珠丝杠副螺母成型磨削加工建模与仿真[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- FAN Dongfeng. Modelling and Simulation of Large Lead Ball Screw Sub-nut Profile Grinding Machining [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2009.

(编辑 陈勇)

作者简介:刘思奇,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为精密传动。魏沛堂\*(通信作者),男,1984年生,教授、博士研究生导师。研究方向为精密传动与齿轮抗疲劳设计制造等。E-mail: peitangwei@cqu.edu.cn。

#### 本文引用格式:

刘思奇,魏沛堂,胡瑞,等. 行星滚柱丝杠螺纹加工误差统计分析与国内外对比研究[J]. 中国机械工程,2025,36(8):1713-1727.

LIU Siqu, WEI Peitang, HU Rui, et al. Statistical analysis of planetary roller screw thread machining errors and comparative study at home and abroad [J]. China Mechanical Engineering, 2025,36(8):1713-1727.