论文

研磨对滚珠丝杠副精度性能影响分析

赵蕾磊^{1*}, 冯虎田¹, 丁聪²

1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 中船重工鹏力(南京)智能装备系统有限公司, 南京 211106

* E-mail: zll_cindy@163.com

收稿日期: 2019-04-29; 接受日期: 2019-06-13; 网络版发表日期: 2019-08-23

国家科技重大专项(编号: 2018ZX04039001)资助项目

摘要 研磨常被作为最后一道工序来提高丝杠的精度和表面质量, 但是现存的人工研磨方法过程复杂、效率低下, 对于研磨丝杠的认知仍停留在“知其然不知其所以然”的状态. 另外, 滚珠丝杠副的精度保持性直接影响到自身乃至作为其配置载体的数控机床的使用寿命与性能优劣, 对于研磨技术的研究, 也应以提高滚珠丝杠副精度保持性为最终目标. 为了进一步探究丝杠研磨方法, 使用改进的丝杠滚道自动研磨磨具及工艺, 在优化的研磨参数下进行试验, 并对研磨效果进行评估. 提出一种滚珠丝杠副精度损失计算方法, 并使用已磨丝杠与未磨丝杠进行滚珠丝杠副精度损失对比试验. 通过测量和计算, 对比其各个阶段的摩擦力矩和行程误差, 分析研磨对丝杠精度损失的影响. 结果表明, 研磨不仅可以提高丝杠精度储备量, 对提高丝杠的精度保持性也有积极意义.

关键词 滚珠丝杠, 研磨, 行程误差, 精度, 残余应力

1 引言

滚珠丝杠副是一种重要的力与运动传动装置, 是数控机床的关键功能部件^[1-4]. 为了满足现代工业的高精度需求, 研磨常被作为最后一道工序来改善丝杠行程误差、提高丝杠表面质量. 究其原因, 是因为研磨技术具有加工原理独特、加工设备结构简单、对设备制造精度和对环境因素要求不高等特点^[5].

早在20世纪六十年代, 学者黄祖尧^[6]就对使用螺纹研磨法提高精密丝杠的螺距精度进行了整理, 阐述了研磨过程, 介绍了半螺母磨具的特点及制造方法, 并对研磨方式、研磨剂用量、研磨压力等问题进行了简单分析. 研磨对提高丝杠精度是非常有效的, 但是现

存的研磨方法不仅效率低, 还严重依赖操作工人. 传统研磨方法中, 工人手持一种两狭缝的工具进行手动研磨, 研磨压力、研磨速度等参数的控制都取决于工人的经验, 研磨效果也与工人经验紧密相关, 是一项“凭感觉”的技术.

虽然通过研磨来获得高精度丝杠不是一种新的方法, 但极少有学者致力于这方面的研究, 对于丝杠研磨的相关研究较少, 专业研磨丝杠的装备更是匮乏. Kyusojin等人^[7,8]为研磨过程的分析做出了重要贡献, 他们提出了圆周研磨理论并设计了一种新的磨具, 该磨具可快速修整任意多边形截面. 基于该理论, Guevarra等人^[9,10]设计了一种新型丝杠磨具并搭建了一套卧式研磨系统. 该磨具弥补了传统两狭缝或三狭缝磨具使用

引用格式: 赵蕾磊, 冯虎田, 丁聪. 研磨对滚珠丝杠副精度性能影响分析. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 183–193

Zhao L L, Feng H T, Ding C. Analysis of the precision performance of a ball screw after lapping (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 183–193, doi: 10.1360/SST-2019-0165

时易出现偏心的缺点, 试验结果也表明, 被该磨具研磨的丝杠行程误差被很好地改善并具有较高的研磨效率. 虽然以上研究满足了提高丝杠精度的需求, 但依然存在一些问题. 第一, 试验使用的丝杠尺寸非常小, 丝杠外径仅14 mm, 导程2 mm, 丝杠全长仅260 mm, 该组尺寸远小于大多数机床使用的丝杠尺寸. 第二, 用于评价丝杠研磨效果的参数不够充分, 仅使用了行程误差作为评价标准. 第三, 不同的研磨参数, 如磨粒尺寸、研磨速度等, 会带来不同的研磨效果, 研磨参数对研磨效果的影响规律未被研究. 针对以上问题, Zhao等人^[11]设计了改进的丝杠磨具, 并提出一套新的丝杠研磨方法, 该方法在特殊设计的滚珠丝杠副摩擦力矩试验台上进行, 研磨过程中摩擦力矩可被实时监测. 另外, 文中对研磨因素(摩擦力矩、转速、磨粒大小、研磨时间等)对丝杠精度和表面质量的影响也进行了定量分析. 本文是在文献^[11]的基础上, 对丝杠研磨工艺的进一步探究. 使用改进的丝杠滚道自动研磨磨具及工艺, 在优化的研磨参数组合下进行试验, 并对研磨效果进行评估. 另外, 对丝杠滚道研磨工艺的研究, 应以提升国产滚珠丝杠副精度保持能力为最终目标, 因此本文提出一种滚珠丝杠副精度损失计算方法, 并使用已磨丝杠与未磨丝杠进行滚珠丝杠副精度损失对比试验. 通过测量和计算, 对比其各个阶段的摩擦力矩和行程误差, 分析研磨对丝杠精度损失的影响.

2 基于优化研磨参数的研磨成效分析

2.1 改进的磨具及其研磨工艺

新型磨具设计的理论基础是Kyusojin等人^[7,8]提出的圆周研磨理论. 该理论假设使用一个 k 角正多边形磨具去研磨一个工件, 磨具与该工件的外表面相接触. 如图1所示, l_i 和 l_{i+1} 是磨具的两条边, o 是工件的中心. oA_i 与 l_i 垂直, oA_{i+1} 与 l_{i+1} 垂直. $B_i(x_i, y_i)$ 是 l_i 与 l_{i+1} 的交点. 该工件的半径 $r(\theta)$ 在切线极坐标系中表示, 使用傅里叶级数可表示为

$$\begin{aligned} r(\theta) &= C_0 + C_2 \cos(2\theta + \varphi_2) + \dots + C_n \cos(n\theta + \varphi_n) + \dots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n\theta + \varphi_n). \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\varphi_0=0$, $C_1=0$.

该理论的目的即是求解点 G 的坐标. $G(x_G, y_G)$ 用于

图1 磨具沿工件外表面旋转

Figure 1 Schematic diagram of the contact of the lapping tool with the external surface of the workpiece.

表示当磨具沿工件外表面旋转时磨具的中心, 即 G 在各顶点 B_i 的平均位置. (x_G, y_G) 的计算结果可表示为

$$\begin{cases} x_G = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos[(n+1)\theta + \varphi_n], \\ y_G = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin[(n+1)\theta + \varphi_n], \end{cases} \quad (2)$$

其中, $n+1 = mk$.

$$\begin{cases} x_G = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos[(n-1)\theta + \varphi_n], \\ y_G = -\sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin[(n-1)\theta + \varphi_n], \end{cases} \quad (3)$$

其中, $n-1 = mk$.

当条件 $n \pm 1 = mk$ (m 是整数)满足时, $x_G \neq 0$, 这意味着磨具的中心与工件的中心没有重合. 磨具中心随工件外轮廓变化的计算结果如表1所示. 表中空白部分表示磨具中心与工件中心始终重合; 表中“*”表示磨具中心与工件中心没有重合, 磨具只是沿着工件的凹凸轮廓按照相同的幅度振摆回转, 无论怎样研磨都不可能接近所需的正圆形. 该理论表明, 磨具与工件的中心必须始终重合才能达到预期的研磨效果, 消除误差. 因此, 根据计算结果, 新磨具的设计选用六狭缝数, 并将其设计为便于安装在摩擦力矩试验台上的结构.

图2所示为改进的磨具结构. 该磨具可分为五部分: 螺纹端盖、垫片、聚氨酯外圈、支撑外圈和研磨螺母. 研磨螺母是该磨具的核心, 其外形为空心圆柱状, 内部型面与待加工丝杠外滚道型面相配合. 研磨

表 1 k 角磨具去除多边形分量
Table 1 Results of using the lapping tool with k angles

工件外轮廓	k 角正多边形									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
椭圆		*								
三边形	*		*							
四边形		*		*						
五边形	*	*	*		*					
六边形				*		*				
七边形	*	*	*		*		*			
八边形		*				*		*		
九边形	*		*	*			*		*	
十边形		*						*		*

图 2 (网络版彩图)磨具结构: a-螺纹端盖, b-垫片, c-螺母, d-聚氨酯外圈, e-支撑外圈
Figure 2 (Color online) Structure of the lapping tool: a-the threaded end cover, b-the spacer, c-the lapping nut, d-the polyurethane outer ring, e-the housing.

螺母尺寸按照选购的待研磨丝杠设计, 若被研磨丝杠的尺寸发生变化, 研磨螺母的尺寸也应做出相应的改变. 使用时, 先将丝杠旋入研磨螺母, 再将聚氨酯外圈套在研磨螺母外, 最后从丝杠两端分别套入支撑外圈、垫片和螺纹端盖, 如图3所示. 当螺纹端盖被拧紧时, 聚氨酯外圈被挤压, 磨粒在其提供的压力下在磨具与工件表面间运动, 达到研磨效果.

研磨在特殊设计的滚珠丝杠副摩擦力矩试验台上进行. 摩擦力矩试验台结构如图4(a)所示, 丝杠一端由三爪卡盘固定, 另一端由尾架上的顶尖固定. 丝杠被电机驱动旋转, 转速和旋转方向可根据需求设定. 如图4(b)所示, 试验台工作台上支撑单元与丝杠滚道接触, 这样当丝杠旋转时, 可以带动工作台沿丝杠轴线移动. 丝杠被电机驱动旋转, 丝杠内的摩擦力矩通过测力螺栓传递给安装在Y型支架上的力传感器, 测量系统接收传感器信号并进行数据处理, 摩擦力矩的测量值会实时显示在显示器上. 试验前, 应先将磨具安装在丝

图 3 研磨工装装备连接图
Figure 3 Installation method of the lapping tool.

杠上, 再将丝杠安装在试验台上(如图4(c)所示). 开始研磨前应先调好的磨粒混合物均匀涂抹在丝杠表面, 电机驱动被研磨丝杠旋转, 磨具将沿丝杠轴线在丝杠上移动. 研磨过程就在磨具的往复运动中实现.

2.2 试验方法

在文献[11]中, 通过一组四因素三水平的正交试验, 讨论了四个研磨因素——摩擦力矩、转速、磨粒大小和研磨时间(由磨具往返次数控制)对研磨效果的影响. 各个参数水平设置为: 摩擦力矩1~1.5, 2~2.5和3~3.5 N·m; 转速10, 30和50 r/min; 磨粒600, 800和1000目; 磨具往返6, 12和18次. 由试验结果, 可得到以下结论.

(1) 摩擦力矩对行程误差有最大影响, 摩擦力矩的增大导致行程误差急剧增大; 与摩擦力矩相比, 转速和

图 4 (网络版彩图)摩擦力矩试验台结构(a)、试验台工作台结构(b)和待磨丝杠安装于试验台(c)

Figure 4 (Color online) Friction torque test machine (a), details of the work table (b), and the connection method between the test machine and the tested screw (c).

磨粒尺寸对行程误差的影响较小, 而研磨时间对行程误差的影响更是可以忽略不计. 如果仅考虑行程误差, 研磨参数的最佳组合是: 摩擦力矩 $1\sim 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$, 转速 50 r/min , 磨粒 800 目 , 磨具往返 12 次.

(2) 无论使用什么样的参数组合, 表面粗糙度都会增大, 其中, 摩擦力矩对表面粗糙度有最大影响, 增大摩擦力矩会增大表面粗糙度; 与摩擦力矩相比, 转速、磨粒尺寸和研磨时间对粗糙度影响较小且影响程度基本相同. 如果仅考虑表面粗糙度, 研磨参数的最佳组合是: 摩擦力矩 $1\sim 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$, 转速 30 r/min , 磨粒 1000 目 , 磨具往返 6 次.

(3) 无论使用什么样的参数组合, 残余压应力都会增大, 其中, 磨粒尺寸对残余应力有最大影响, 其次是摩擦力矩和研磨时间; 增大磨粒尺寸、增加摩擦力矩和延长研磨时间都可以增大残余压应力; 转速对残余应力的影响与其他三者相比, 并不明显. 如果仅考虑残余应力, 研磨参数的最佳组合是: 摩擦力矩 $3\sim 3.5\text{ N}\cdot\text{m}$, 转速 30 r/min , 磨粒 600 目 , 磨具往返 18 次.

根据试验结果及分析, 本研究使用参数如表2所示. 由于摩擦力矩对行程误差和表面粗糙度的影响远高于其他三个因素, 且摩擦力矩的增加使行程误差急剧变差; 为了改善行程误差, 摩擦力矩取值为 $1\sim 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$.

转速对三个评定标准的影响都不是很明显, 但考虑 30 r/min 下表面粗糙度和残余应力有最佳结果, 验证试验设定转速为 30 r/min .

磨粒尺寸对残余应力有最大影响. 600 目 的磨粒可以极大地提高残余压应力. 虽然对于行程误差和表面粗糙度, 600 目 并不是最佳选择, 但磨粒尺寸不是影响这两者的重要因素. 因此, 600 目 是磨粒尺寸的最佳取值.

研磨时间越长, 表面粗糙度越差, 但增加研磨时间可以提高残余压应力. 考虑到研磨时间对于残余应力的影响大于对粗糙度的影响, 且粗糙度可以通过后续加工过程改善, 因此, 磨具往返 18 次是最佳选择. 试验选用金刚石磨粒, 研磨剂为磨粒与机油按照体积比 $3:1$ 比例进行调配. 使用丝杠行程误差、表面粗糙度和残余应力来评价研磨效果. 试验前应先测量丝杠的初始行程误差. 被测丝杠在末端有一段未研磨段, 长度约

表 2 试验参数及丝杠基本参数

Table 2 Details of the experiment and parameters of the tested screw

参数	数值
转速(r/min)	30
摩擦力矩(N·m)	1~1.5
磨粒尺寸(目)	600
研磨时间(磨具往返次数)	18
丝杠螺纹长度(mm)	1000
直径(mm)	40
节距(mm)	10
螺旋升角(°)	4.55
滚道形状	双圆弧滚道

为200 mm. 当试验完成后, 清洗被测丝杠并再次测量其行程误差. 行程误差测量后, 丝杠将被切样. 丝杠有两组样件, 一组来自研磨段, 另一组来自未研磨段, 每个样件的长度为80 mm. 这些样件将用于测量表面粗糙度和残余应力. 在之后的分析中, 未研磨段的表面粗糙度和残余应力会被用来作为参考值.

2.3 结果与分析

测量结果如表3所示. 行程误差的测量在滚珠丝杠行程误差试验台上进行. 使用有效行程内行程误差 V_u 评估, 测量三次取平均值. $\overline{V}_{u0}$ 表示丝杠研磨前行程误差测量均值, $\overline{V}_u$ 表示研磨后. 可以看出, 磨后丝杠的行程误差得到了改善, 这之前正交试验结果一致.

表面粗糙度测量使用表面白光干涉仪. 每个丝杠样件有三个测量点, 在轴向均匀分布并相距120°. 样件的左圆弧和右圆弧被分别测量. $\overline{R}_{aL0}$ 和 $\overline{R}_{aR0}$ 分别表示研磨前左滚道和右滚道的表面粗糙度. $\overline{R}_{aL}$ 表示磨后左滚道表面粗糙度, $\overline{R}_{aR}$ 表示磨后右滚道表面粗糙度. 由表3可知, $\overline{R}_{aL}$ 大于 $\overline{R}_{aL0}$, 即研磨过程中磨粒对滚道表面的微切削、犁耕和压痕等作用, 使磨后粗糙度增大, 但仍能保持较高水平. 由右滚道测量结果也可得到相同结论.

残余应力测量使用X射线应力检测仪. 残余应力的测量点与粗糙度测量点相同. $\overline{RS}_{L0}$ 和 $\overline{RS}_{R0}$ 分别表示左滚道和右滚道的残余应力初始值. $\overline{RS}_L$ 和 $\overline{RS}_R$ 表示磨后左滚道和右滚道残余应力测量值. 由测量结果可知, 无论磨前还是磨后, 残余应力测量值均为负值, 这表示

样件处于残余压应力状态; 研磨后样件的残余应力绝对值均大幅增加, 这之前正交试验结果一致; 增大的残余压应力有利于延长丝杠的使用寿命^[12~14].

可使残余压应力增大的原因主要是机械作用和相变. 由于磨粒对滚道表面的微切削、犁耕及压痕等机械作用, 使滚道表面产生塑性变形, 有助于提高残余压应力. 随着研磨时间的增大, 塑性变形程度也增大, 残余压应力也随之增大, 这与正交试验所得结果一致: 研磨时间越长, 残余压应力越大. 虽然以往研究表明, 在研磨过程中, 残余奥氏体可能转变为马氏体, 从而改变残余应力^[15]. 但在本次试验中, 采用XRD法测定残余奥氏体含量(测量结果见表4), 研磨前后滚道表面残余奥氏体含量变化不大且含量极小. 因此, 相变对残余应力的影响可以忽略不计. 机械作用是研磨后残余压应力增加的主要原因.

3 研磨对丝杠精度损失的影响

在数控技术向高速化、精密化发展的前提下, 滚珠丝杠副存在使用寿命短、磨损失效快等一系列问题, 严重影响了生产加工质量. 滚珠丝杠副的精度保持性问题直接影响到自身乃至作为其配置载体的数控机床的使用寿命与性能优劣, 是滚珠丝杠副的重要性能指标. 由前文的分析可以得到, 研磨后丝杠的行程误差得到改善, 提高了精度储备量, 表面残余压应力也得到了显著提高, 但还不能说明研磨是否对丝杠的精度损失趋势有有利影响. 因此, 本节的目的是为了研究研磨是否可以降低丝杠的精度损失速度, 改善丝杠

表3 试验结果

Table 3 Experimental results

	行程误差(μm)	表面粗糙度(μm)		残余应力(MPa)	
磨前	$\overline{V}_{u0}=6.41$	$\overline{R}_{aL0}=0.838$	$\overline{R}_{aR0}=0.913$	$\overline{RS}_{L0}=-136.6$	$\overline{RS}_{R0}=-150.0$
磨后	$\overline{V}_u=5.16$	$\overline{R}_{aL}=1.424$	$\overline{R}_{aR}=1.416$	$\overline{RS}_L=-380.8$	$\overline{RS}_R=-392.9$

表4 丝杠样件残余奥氏体含量

Table 4 Residual austenite content of sample pieces

测量点	1	2	3	4	5
研磨前	0.6%	1.7%	2.2%	0.5%	1.0%
研磨后	0.5%	3.0%	2.9%	0.2%	2.9%

使用性能, 获得更高精度保持性的丝杠.

3.1 未磨丝杠与已磨丝杠的行程误差变化趋势

选择上组试验中磨后丝杠进行精度损失试验, 使用同批次采购的未磨丝杠作为对比. 精度损失试验在滚珠丝杠副精度保持性试验台上进行(图5), 可同时两根丝杠进行试验. 该试验台可以记录丝杠累积转数, 控制丝杠的转速和旋转方向. 本次试验设置转速为 600 r/min, 有效行程为 700 mm, 试验间隔为 70×10^4 转, 即每隔 70×10^4 转, 测量两根丝杠副的行程误差和摩擦力矩. 试验开始前先给被测丝杠装配好螺母并再次测量 $V_{2\pi}$ 与 V_u 的初始值.

试验结果如图6所示, 两图分别表示短周期误差 $V_{2\pi}$ 和有效行程内行程误差 V_u 的变化情况. 由图6(a)可知, 未磨丝杠的初始 $V_{2\pi}$ 值为 $2.53 \mu\text{m}$, 而已磨丝杠因为经过研磨, 初始 $V_{2\pi}$ 值为 $2.19 \mu\text{m}$. 可以看出, 未磨丝杠的 $V_{2\pi}$ 值在前三个阶段有一个明显的波动, $V_{2\pi}$ 值轻微升高后下降至低于初始值, 而后又大幅度上升并保持持续上升的状态. 已磨丝杠在初期 $V_{2\pi}$ 值同样存在波动, 第一周期结束后 $V_{2\pi}$ 值甚至高于未磨丝杠, 但从第二周期后 $V_{2\pi}$ 值保持较为平稳的上升速度. 第三阶段直至试验结束, 未磨丝杠的 $V_{2\pi}$ 值始终高于已磨丝杠. 试验结束后, 已磨丝杠与未磨丝杠 $V_{2\pi}$ 增长率均约为 60%. 由于 $V_{2\pi}$ 测量值仅反映极短周期内(一个 2π 弧度)行程变动量, 虽然波动期过后已磨丝杠的 $V_{2\pi}$ 测量值低于未磨丝杠, 但将已磨丝杠的增长率与未磨丝杠对比, 已磨丝杠

图5 (网络版彩图)滚珠丝杠副精度保持性试验台

Figure 5 (Color online) Test machine for a ball screw precision variation measurement.

并无明显优势.

如图6(b)所示, 两根丝杠的 V_u 值在整个试验阶段基本呈上升趋势. 未磨丝杠的初始 V_u 值为 $6.53 \mu\text{m}$, 而已磨丝杠初始 V_u 值为 $5.28 \mu\text{m}$. 整个试验阶段, 未磨丝杠的 V_u 值始终高于已磨丝杠. 根据测量值曲线整体变化趋势, 对于未磨丝杠, 第三阶段后其 V_u 值出现明显的上升趋势且增长速度逐渐增大; 而对于已磨丝杠, 第五阶段后其 V_u 值逐渐上升且速度与未磨丝杠相比较为平缓. 试验结束后, 已磨丝杠的 V_u 值较初始值增长率约为 24%, 而未磨丝杠的 V_u 值增长率约为 36%, 即已磨丝杠的精度损失速度低于未磨丝杠. 以下将对 V_u 的变化趋势做进一步分析.

图6 (网络版彩图)短周期误差 $V_{2\pi}$ (a)和总有效行程内行程误差 V_u (b)

Figure 6 (Color online) Measurement results of the travel variation in a screw lead (a) and the travel variation in total effective travel (b).

3.2 精度损失分析

3.2.1 精度损失计算方法

在进行研磨对丝杠副精度损失的影响分析前, 首先提出滚珠丝杠副精度损失计算分析与方法. 根据Lin和Wei等人^[1-3]的研究, 为了描述滚珠、丝杠和螺母的运动, 需要用到几组坐标系. 如图7(a), $o-x'y'z'$ 为固定坐标系; $o-xyz$ 随丝杠旋转, 为旋转坐标系. Ω 表示旋转坐标系对固定坐标系的角位移; Ω 对时间微分, 即为丝杠旋转速度 ω . o' 是滚珠球心, o' 在 $x-y$ 平面上的投影点与 o 的距离为丝杠轴的节圆半径 r_m . o' 与 o 的连线在 $x-y$ 平面上的投影与 x 轴夹角为 φ ; 将 φ 对时间微分即可得滚珠球心对丝杠 z 轴的公转角速度 ω_m . $o'-tnb$ 表示Frenet移动坐标系, 该坐标系随滚珠球心移动. U 轴为滚珠的自旋轴. β 和 β' 被称为两个自旋角, 其中 β' 值非常小, 可在计算中认为0.

如果一个滚珠沿 t 轴方向, 在螺旋升角为 α 、旋转速度为 ω 的丝杠表面上移动, 其公转角速度为 ω_m , 自转角速度为 ω_R . 由于与滚珠半径相比, 滚珠与滚道间

的弹性接触变形很小, 因此, ω , ω_m 和 ω_R 之间的关系可近似表示为

$$\frac{\omega_m}{\omega} = \frac{1}{1 + \frac{(1+\gamma'\cos\alpha_o)(\cos\alpha_i + \tan\beta\sin\alpha_i)}{(1-\gamma'\cos\alpha_i)(\cos\alpha_o + \tan\beta\sin\alpha_o)}}, \quad (4)$$

$$\frac{\omega_R}{\omega_m} = \frac{-(1+\gamma'\cos\alpha_o)\cos\alpha}{\gamma'(\cos\beta\cos\alpha_o + \sin\beta\sin\alpha_o)}, \quad (5)$$

其中, α_i , α_o 分别表示滚珠-丝杠和滚珠-螺母间的接触角; γ' 定义为 $\gamma'=d_b/d_m$, d_b 为滚珠直径, d_m 为 r_m 的两倍值. 式(4)和(5)是用于计算 ω_m 与 ω_R 的重要关系式.

如图7(b)所示, 滚珠与螺母的接触点为 A , 滚珠与丝杠的接触点为 B , 在两接触点上分别建立坐标系 $A-X_oY_oZ_o$ 和 $B-X_iY_iZ_i$. 使用 $\vec{V}_{An}$ 表示螺母上 A 点速度, $\vec{V}_{Ab}$ 表示滚珠上 A 点速度; 使用 $\vec{V}_{Bs}$ 表示丝杠上 B 点的速度, $\vec{V}_{Bb}$ 表示滚珠上 B 点速度; 使用 $\vec{V}_{SA}$ 和 $\vec{V}_{SB}$ 表示两接触点上的滑动速度. 令 $d=r_m/\cos\alpha$, 接触点上滑动速度可表示为

$$\begin{aligned} \vec{V}_{SA} = \vec{V}_{Ab} - \vec{V}_{An} &= \begin{bmatrix} d(\omega_m - \omega) + r_m\omega\cos\alpha + r_b(\omega_b\cos\alpha_o - \omega_n\sin\alpha_o) + r_m\omega\sin\alpha\tan\alpha \\ r_b\omega_i\sin\alpha_o \\ -r_b\omega_i\cos\alpha_o \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -r_b\omega_i \\ d(\omega_m - \omega) + r_m\omega\cos\alpha + r_b(\omega_b\cos\alpha_o - \omega_n\sin\alpha_o) + r_m\omega\sin\alpha\tan\alpha \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{SB} = \vec{V}_{Bb} - \vec{V}_{Bs} &= \begin{bmatrix} d(\omega_m - \omega) - r_b[\omega_n\sin\alpha_i - \cos\alpha_i(\omega_b + \omega\cos\alpha)] \\ -r_b(\omega_i - \omega\sin\alpha)\sin\alpha_i \\ r_b(\omega_i - \omega\sin\alpha)\cos\alpha_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_b(\omega_i - \omega\sin\alpha) \\ d(\omega_m - \omega) - r_b[\omega_n\sin\alpha_i - \cos\alpha_i(\omega_b + \omega\cos\alpha)] \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, ω_i , ω_n 和 ω_b 分别表示滚珠自转角速度 ω_R 在移动坐标系 (t, n, b) 三个方向上的分量, 可由图7(a)所示几何关系求得. 对于滚珠丝杠副常采用的双螺母预紧结构, 调整两螺母之间的垫片即可达到调整预紧力的目的. 由于预紧螺母不参加滚珠丝杠副的工作, 因此, 之后的精度损失分析都将针对工作螺母. 设螺母A为工作螺母, 预紧垫片通过螺母给予丝杠的轴向预紧力为 F_p ,

工作螺母A的实际受力为 F_A . Q_o 和 Q_i 分别表示滚珠上与螺母接触点和与丝杠接触点的法向力. 螺母A内滚珠所受法向力 Q_o 可简化表示为

$$\frac{F_A}{Z} = Q_o\sin\alpha_o\cos\alpha, \quad (8)$$

其中, Z 为滚珠数. 实际情况中, α_i 和 α_o 大小是不相等的. 根据Wei等人^[1]的研究, 随着丝杠转速的升高, 滚珠与

图 7 (网络版彩图)固定、旋转及移动坐标系(a)和滑动速度(b)

Figure 7 (Color online) The world coordinate system, the rotating coordinate system and the Frenet frame (a) and the slip velocities (b).

丝杠的接触角会逐渐增大, 而滚珠与螺母的接触角会逐渐减小. 然而当丝杠转速较小时, 两个接触角间的差距非常小; 当丝杠转速高于1500 r/min时, 两者的差距才逐渐明显. 因此, 本文中认为, α_i 和 α_o 大小相等, 所以有

$$Q_i = Q_o = Q = \frac{F_A}{Z \sin \alpha_o \cos \alpha}. \quad (9)$$

为了计算 F_A , 预紧力 F_p 是需要已知的. 值得注意的是, 丝杠在运转过程中, 由于磨损预紧力会逐渐变小, 精度损失计算中需考虑预紧力的变化. 预紧力无法在不破坏丝杠结构的条件下, 通过普通的测量方式测得, 但摩擦力矩的测量方法已较为成熟, 因此, 可以通过测量摩擦力矩的变化反映预紧力的变化. 测量摩擦力矩时, 应先将丝杠与负载脱开, 设丝杠此时的预紧力为 F_p . 与前述分析类似, 可得此时滚珠所受法向力为 $Q' = F_p / (Z \sin \alpha_o \cos \alpha)$, 从而滚珠上的摩擦力 F_f 可表示为 $F_f' = \mu Q'$ (μ 为摩擦系数). 根据Zhou等人^[16]的研究, 摩擦力矩可表示为

$$\begin{aligned} M_f &= 2ZF_f'(r_m + r_b \cos \alpha_o) \cos \alpha \\ &= \frac{2\mu F_p}{\sin \alpha_o} (r_m + r_b \cos \alpha_o). \end{aligned} \quad (10)$$

利用式(10)可以求得 F_p . 之后, 利用预紧力的计算值, 结合变形协调原理和赫兹接触理论, 即可得到 F_A 的值.

在滚珠丝杠副精度失效前, 黏着磨损是精度下降的主要原因, 精度损失计算将基于Archard理论. 认为

接触峰的接触是球形之间的接触, 设接触球的平均半径为 a . 接触峰发生材料迁移时, 磨屑是半球形的. 当黏着点破裂, 即发生材料迁移时, 需要移动 $2a$ 的距离, 而磨屑的体积为 $2/3\pi a^3$, 磨损率即为

$$\frac{dV}{ds} = \frac{\frac{2}{3}\pi a^3}{2a} = \frac{\pi a^2}{3} = \frac{p_o}{3\sigma_s}, \quad (11)$$

其中, p_o 是单个接触峰上承受的载荷, $p_o = \pi a^2 \sigma_s$; σ_s 是摩擦副中软质材料的屈服极限. 滚珠沿滚道移动过程中, 考虑到不是所有的接触点都会发生材料的迁移, 形成磨屑, 使用系数 K' 来表示所有接触峰可能发生黏着的概率. 该系数与丝杠运行工况、材质等条件有关, 范围约在 $10^{-8} \sim 10^{-11}$. 令 $n_o = Q_j / p_o$, n_o 表示所有接触峰的数量. 磨损量可表示为

$$W_j = K' n_o \frac{dV}{ds} L_j = K' \frac{Q L_j}{3\sigma_s} (j = i \text{ 或 } o), \quad (12)$$

式中, $j = i$ 表示滚珠与丝杠的接触点, $j = o$ 表示滚珠与螺母的接触点. L_j 表示滚珠与丝杠或滚珠与螺母之间的滑动距离, 该距离可使用前文中的滑动速度计算. 由磨损导致的法向变化量可表示为

$$\delta_j = \frac{W_j}{A_{ij}} (j = i \text{ 或 } o), \quad (13)$$

式中, A_{ij} 表示滚珠与丝杠或与螺母的接触面积, 该面积可由赫兹接触理论求得. 轴向变化量 δ_j' 即可表示为

$$\delta_j' = \delta_j \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_j} (j = i \text{ 或 } o). \quad (14)$$

由磨损导致的轴向变化量会反映丝杠行程误差的

改变, 该指标可被试验台测量. 综上, 为了计算滚珠丝杠副精度损失, 需先根据运动学分析计算出滚珠公转角速度 ω_m 、滚珠自转角速度 ω_R , 及其三个分量 ω_t , ω_n 和 ω_b . 使用这几个速度值, 便可计算出滚珠-丝杠和滚珠-螺母接触点的滑动速度. 由于预紧力在丝杠运行过程中是不断变化的, 磨损量计算中必须考虑预紧力的变化, 因此, 预紧力需根据不同阶段测量所得的摩擦力矩来计算. 计算所得的预紧力可用于求出滚珠所受法向力及滚珠-丝杠和滚珠-螺母两接触点的接触面积. 最后, 结合之前的速度计算、滚珠受力分析以及接触面积的计算, 可进一步求得接触点上的轴向磨损量. 磨损量的存在导致滚珠丝杠副精度下降, 造成精度损失.

3.2.2 精度损失的计算与对比

进行精度损失计算需要已知各个阶段的摩擦力矩, 两根丝杠各个阶段摩擦力矩测量值如图8所示. 未磨丝杠的摩擦力矩初始值为1.133 N·m, 已磨丝杠的摩擦力矩初始值为1.032 N·m. 由于磨损, 两根丝杠的摩擦力矩在整个试验阶段, 随着累积转数的增加均呈下降趋势. 由图可以看出, 已磨丝杠摩擦力矩的降低速度明显的慢且非常平稳, 而未磨丝杠摩擦力矩的降低速度明显大于已磨丝杠. 试验结束后, 未磨丝杠摩擦力矩为0.679 N·m, 下降约40%; 而已磨丝杠摩擦力矩为0.766 N·m, 下降约26%.

由上节提出的精度损失计算方法, 可以计算出各阶段滚珠丝杠副的磨损量. 图9所示为摩擦力矩与各阶段精度损失的计算值, 折线图为摩擦力矩, 柱状图为随摩擦力矩变化的各个阶段的精度损失分布. 对于同一根丝杠, 可以看出精度损失量与摩擦力矩值相关, 摩擦力矩值越大, 对应的该阶段的精度损失值越大.

将各个阶段的精度损失值进行累加, 并以两根滚珠丝杠副的初始 V_d 值作为基础, 可以得到其 V_d 变化趋势的计算值. 由于在第一阶段两根丝杠副的摩擦力矩变化均较大, 认为丝杠副还处于跑合阶段, 因此, 取第一阶段结束后的 V_d 值为初始值. 图10所示为 V_d 测量值与计算值的对比. 对于未磨丝杠, 计算值基本处于测量值之间, 贯穿测量值折线, 试验后期测量值略高于计算值. 而对于已磨丝杠, 计算值整体处于测量值之上, 即计算值预测的精度损失大于实际形成的精度损失.

图8 (网络版彩图)各阶段摩擦力矩测量值
Figure 8 (Color online) Measurement results of friction torque in each experimental period.

图9 (网络版彩图)摩擦力矩与各阶段精度损失计算值. (a) 未磨丝杠; (b) 已磨丝杠

Figure 9 (Color online) Measurement results of friction torque and calculated results of precision loss in each experimental period. (a) The screw not lapped; (b) the screw lapped.

图 10 (网络版彩图)行程误差 V_u 测量值与计算值
Figure 10 (Color online) Comparison of measurement results and calculated results of travel variation.

当工件表面粗糙度达到一定精度, 决定其可靠性的主要因素是表面残余应力、微硬度等物理性能。其中, 表面残余应力是材料的表面力学性能之一, 对材料的疲劳断裂、磨损和腐蚀等失效形式有重要影响; 优化材料表面力学性能是提高材料整体性能和寿命的有效手段。在精度计算过程中, 精度损失值不仅与丝杠工作参数有关, 也与丝杠材料性能有关; 两根丝杠由于材料相同, 使用了相同的屈服极限进行计算; 但对于已磨丝杠出现的计算值整体处于测量值之上的情况, 认为是研磨带来的丝杠材质物理性能改善的结果, 即残余压应力的提高, 这一点在摩擦力矩的对比中也有反映。因此, 综合两根丝杠行程误差、摩擦力矩的变化规律以及行程误差测量值与计算值的对比分析, 认为

研磨工艺不仅可以增加丝杠的精度储备量, 其对丝杠材质性能的改善有助于降低丝杠的精度损失速度, 延长丝杠精度寿命。

4 结论

(1) 在高精丝杠制造中, 研磨工艺常作为一种辅助手段, 但当所需丝杠精度超出现有丝杠加工机床所能达到的精度时, 研磨成为及其重要的工艺方法。本文提出了一套改进的丝杠自动研磨方法, 以改变现有的手工研磨现状。此外, 还针对研磨工艺进行了细致的、创新性的研究。

(2) 本文使用改进的丝杠自动研磨方法并使用优化的研磨参数进行了试验。试验结果表明, 试验丝杠的行程误差和表面质量都得到了提高, 证明了优化研磨参数组合的有效性。

(3) 由已磨丝杠与未磨丝杠的精度损失试验结果可知, 未磨丝杠行程误差的增长速度高于已磨丝杠, 随着运行时间的增长, 两者间距离也越来越大。对比两根丝杠摩擦力矩的测量值, 已磨丝杠摩擦力矩降低速度缓慢且平稳, 而未磨丝杠的摩擦力矩降低速度较快。

(4) 根据文中提出的精度损失计算方法, 可以计算精度损失, 得到行程误差的计算值。将两根丝杠行程误差的计算值与测量值进行对比分析认为, 研磨工艺不仅可以增加丝杠的精度储备量, 还可以改善丝杠材料性能, 有助于降低丝杠的精度损失速度, 延长丝杠精度寿命。

参考文献

- Wei C C, Lin J F. Kinematic analysis of the ball screw mechanism considering variable contact angles and elastic deformations. *J Mech Des*, 2004, 125: 717-733
- Lin M C, Ravani B, Velinsky S A. Kinematics of the ball screw mechanism. *J Mech Des*, 1994, 116: 849-855
- Lin M C, Velinsky S A, Ravani B. Design of the ball screw mechanism for optimal efficiency. *J Mech Des*, 1994, 116: 856-861
- Zhao L, Feng H, Rong Q. A novel non-contact measuring system for the thread profile of a ball screw. *Mech Sci*, 2018, 9: 15-24
- Lu C D, Wang X, Wen D H, et al. Research on the development of ultra-precision lapping and detection technology (1) (in Chinese). *Modern Manuf Eng*, 2008, 3: 126-128 [鲁聪达, 王笑, 文东辉, 等. 超精密研磨技术及其发展的研究(上). 现代制造工程, 2008, 3: 126-128]
- Huang Z. A thread lapping method for improving precision of a ball screw (in Chinese). *Manuf Technol Mach Tool*, 1965, 4: 13-17 [黄祖尧. 用螺纹研磨法提高精密丝杠的螺距精度. 制造技术与机床, 1965, 4: 13-17]
- Kyusojin A, Inada H. Lapping high precision polygonal shafts. *Precision Eng*, 1984, 6: 3-8
- Kyusojin A, Nishimoto K, Kubota S, et al. Development of the lap for correcting cylindrical axes. *J Jpn Soc Precision Eng*, 1979, 45: 913-918

- 9 Guevarra D S, Kyusojin A, Isobe H, et al. Development of a new lapping method for high precision ball screw (1st report)-feasibility study of a prototyped lapping tool for automatic lapping process. *Precision Eng*, 2001, 25: 63–69
- 10 Guevarra D S, Kyusojin A, Isobe H, et al. Development of a new lapping method for high precision ball screw (2nd report): Design and experimental study of an automatic lapping machine with in-process torque monitoring system. *Precision Eng*, 2002, 26: 389–395
- 11 Zhao L, Feng H, Jin J. A modified ball screw lapping method and optimized lapping factors for ideal surface quality. *Mech Sci*, 2018, 9: 221–230
- 12 El-Axir M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *Int J Mach Tools Manuf*, 2002, 42: 1055–1063
- 13 Sasahara H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel. *Int J Mach Tools Manuf*, 2005, 45: 131–136
- 14 Segawa T, Sasahara H, Tsutsumi M. Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface. *Int J Mach Tools Manuf*, 2004, 44: 1215–1221
- 15 Cai P L, Wang H B, Chen Z. Influence of strengthening treatment on residual stress and microstructure of GCr15 bearing steel ball (in Chinese). *Mater Sci Technol*, 2013, 21: 144–148 [蔡培雷, 汪宏斌, 陈卓. 强化处理对GCr15钢球残余应力和微观组织的影响. *材料科学与工艺*, 2013, 21: 144–148]
- 16 Zhou C G, Feng H T, Chen Z T, et al. Correlation between preload and no-load drag torque of ball screws. *Int J Mach Tools Manuf*, 2016, 102: 35–40

Analysis of the precision performance of a ball screw after lapping

ZHAO LeiLei¹, FENG HuTian¹ & DING Cong²

¹ Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

² CSIC Pride (Nanjing) Intelligent System, Co., LTD., Nanjing 211106, China

Lapping is used as the last process to improve the precision and surface quality of a ball screw. However, the existing ball screw lapping method is very complex, time-consuming, and has low production efficiency. Only a few studies studied the process mechanism of ball screw lapping. In addition, the precision retaining ability of a screw affects its service life and performance of a CNC machine. Thus, improving the precision retaining ability of a screw is an important goal of the lapping technology field. This study conducts further research of the modified ball screw lapping method. The effectiveness of the analysis of the lapping parameters is verified by the experiments. Since the precision retaining ability is one of the most important properties of a ball screw, the calculation method of the precision loss of a ball screw is proposed. The proposed method is verified by the precision variation experiment using the lapped and not-lapped ball screw. The experimental results showed that lapping not only improves the travel variation of a ball screw but also improved its ability to maintain high precision.

ball screw, lapping, travel variation, precision, residual stress

doi: [10.1360/SST-2019-0165](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0165)