

初论滚珠丝杠副的柔顺性（下）

深圳市威远精密技术有限公司 （518108） 柔顺性课题组

5. 零部件的制造精度和装配质量是改善柔顺性的根本途径

本文在第3点中分析了从滚动螺旋传动副的摩擦特性影响柔顺性的内在因素，实践证明，什么样的工艺水

平，就会有什么样的产品质量。表3列出了滚珠丝杠副各主要零件的结构、制造精度及装配质量对柔顺性的影响及相应的对策。

以降低预紧力 F_{pr} 来“迎合”柔顺性要求的做法是

表3 影响柔顺性的主要因素及对策

项目 内容	影响因素	对策
滚珠丝杠	齿形精度（滚道半径、接触角、齿形两侧面对称度）	提高砂轮修整精度，严格检查齿形误差
	圆弧滚道面的表面粗糙度	提高螺纹磨床砂轮轴系刚度，优选砂轮
	螺纹中径尺寸一致性	中径自动测量与补偿，提高中心架精度，优选砂轮
	丝杠齿顶圆角（内循环）	改进砂轮修整方法，使齿顶圆角与滚道圆弧平滑连接
	螺纹分度精度（螺纹线数 > 1）	提高丝杠磨床的分度精度
滚珠螺母	齿形精度（滚道半径、接触角、齿形两侧面对称度）	采用金刚滚轮修整
	内螺纹滚道面的表面粗糙度	采用 CBN 磨轮，提高砂轮轴系的刚度
	反向孔的对中精度	采用 CNC 内螺纹磨削中心，提高对刀精度
	定位，安装面与中径的径跳、端跳	采用 CNC 内螺纹磨削中心，提高对刀精度
	内螺纹分度精度（螺纹线数 > 1）	提高内螺纹磨床的分度精度、分度误差与丝杠一致
滚珠链返向装置	残磁值（ mT ）含量超标	参照 JB/GQ1098—87 行标，控制残磁值（ mT ）含量，严格退磁（包括丝杠轴）
	滚珠的精度（ V_{DWS} 、 D_{qph} 、 R_a 等）	钢珠精度与丝杠副精度匹配，并严格验收
	滚珠相互撞击、摩擦	采用间隔滚珠、滚珠隔离器等措施
	滚珠材质	采用 PVD 涂层，采用 Si_3N_4 球（高速时）
	反向槽及对接精度	优化回珠槽曲线，提高对接精度，平滑过渡
滚珠丝杠副	装配质量	严格控制滚珠设计数量，严禁混入大径球
	清洁度（含污量）	参照 JB/GQ1098—1987 行标，严格控制丝杠副内的含污量，采用先进的清洗设备
	装配后的空运转及跑合	参照 JB/GQ1098—1987 行标，进行加载跑合及空运转试验，通过磨合改善吻合度，提高初始接触刚度
	润滑不充分，油脂粘度过大	改进润滑方式，优选润滑油
	密封与防尘	改进密封与防尘方式，安装牢靠，间隙适中
	预加负荷过大或过小	提高预紧元件的制造精度，采用定压预紧方式

不可取的。这样做,柔顺性虽然得到了改善、动态预紧转矩呈平稳表象,然而滚珠丝杠副的系统刚度却因 F_{pr} 的降低而下降,导致出现反向间隙。

如何有效解决这个问题,弥补加工出现的缺陷。对于采用变位导程预紧的冷轧滚珠丝杠副,可以在滚珠螺母的中间位置设计成类似弹簧构造的柔性环节实现定压预紧(见图4),在运转过程中弹簧柔性环节将冷轧滚珠丝杠的导程精度误差、中径圆柱度误差、偏心误差等加工误差吸收,从而改善了柔顺性使运转更平稳。

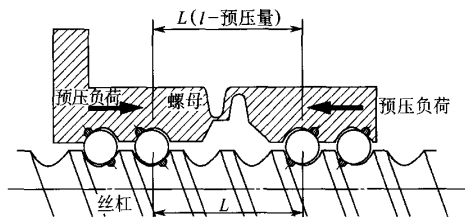


图4 具有弹簧柔性环节的单螺母定压预加负荷

对于垫片式紧的滚珠丝杠副,可在垫片中嵌入“PVF₂压电薄膜预紧传感器”对 F_{pr} 实施动态控制,消除因丝杠中径圆柱度误差、螺旋副滚道齿形误差等因素对预紧转矩的影响,以改善滚珠丝杠副的柔顺性。

在滚珠丝杠副的生产实践中,常常因滚珠螺母反向孔的对中精度和反向装置的加工误差导致回珠槽不能与内螺纹滚道平滑对接,使滚珠进出反向装置产生的Brinell效应更明显。现在大多数企业均采用高速小砂轮和修磨滚珠螺母的接口或反向器回珠槽的进出口(流球口),以使两者平滑连接。采用手工修磨流球口的方法会破坏经过精确计算和制造的回珠槽空间曲面,损坏螺旋滚道面,使滚珠进入修磨处的预加负荷提前释放,从而影响滚珠丝杠副的定位精度和高速运转时的平稳性。这种方法虽然可以解决部分加工缺陷,但这种修配方法是寄托于装配人员个人素质、个人技术为主要因素,这样很难保证产品品质的一致性与稳定性。正确的做法可参照本文表3的对策实施。

6. “标准”与柔顺性

(1) 在现实生产和经营活动中常常出现令用户和制造企业都感到尴尬的局面。产品出厂前按标准采用仪器检验判定“合格”,但用户觉得“不好用”。为什么会出出现两方认识的差异?我们认为有以下因素所致:

①只重视“导程精度”指标而忽视了产品其他性能

指标。表现为产品图样中只提出精度要求,却没有提出诸如预紧力、预紧后的空载转矩、轴向刚度等性能指标,这对于“定位型”(P)滚珠丝杠副却是十分重要的。

②“国家标准”、“ISO 国际标准”不是产品的最高标准。如“ISO 国际标准”所体现的制造水准只是各国都能普遍接受的公认标准,虽然它也反映了先进工业国家的制造水平,但它主要所反映的是国际综合水平。事实上,在世界上不少生产滚珠丝杠副产品的知名企业都制定了高于国家标准和ISO标准的企业(内控)标准,以提高产品的竞争力。

(2) 检定“柔顺性”的几种方法 必须指出,滚珠丝杠副不同受力工作状态、不同预加负荷,不同的运转速度其柔顺性是有差异的。一般来说,在条件都相同的情况下,滚珠丝杠副的轴向间隙不同,柔顺性也不尽相同。一般滚珠丝杠副预紧力大的不如预紧力小的柔顺性好,高转速和低转速也呈现出明显差异,而在 $n < 4$ r/min的低速状态时更能暴露滚珠丝杠副柔顺性的“症结”。

迄今为止在国家标准、ISO 国际标准中均未对柔顺性准确定义,也没有规定考核指标。本文首次提出以下几种直接或间接评定柔顺性的方法:

①测量滚珠丝杠副空载动态预紧转矩,包括测 ΔT_P 和 δT_P ,下面将有详细说明。

②手感检验。在尚未备齐全检测仪器时,可用力矩扳手或弹簧秤测力矩后再采用手感检测。这种方法虽较方便、直观,由于无法制定“手感评定标准”,存在判断的主观片面性,易导致意见分歧现象。

③测量滚珠丝杠副的传动效率 η ,间接判断柔顺性。凡是 η 高的产品柔顺性必然好,反之,柔顺性差的产品也影响传动效率。这个方法较适宜试验研究。

④通过检查滚珠丝杠副的噪声,间接判断柔顺性的状况。对于精密高速滚珠丝杠副来说,借助噪声仪检查并记录下高速运转时不同位置的分贝值,既检测了噪声 dB(A) 值又可间接判断柔顺性。

(3) 有预加负荷的滚珠丝杠副采用测量空载动态预紧转矩偏差 ΔT_P 和一转内 (2π 弧度) 的力矩波动量 ΔT_P ,在间接测量 F_{pr} 的同时可有效地监控柔顺性。当用户给出预加负荷 F_{pr} (N) 时,可按下式计算出理论空载预紧转矩 T_{po} :

$$T_{po} = \frac{F_{pr} P_h}{2\pi\eta} (1 - \eta^2) (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 P_h ——滚珠丝杠基本导程, m

η ——滚珠丝杠副传动效率

根据计算出的 T_{po} 在国家标准 GB/T17507.3 中, 查到与 T_{po} 对应的分挡。按不同精度等级、丝杠不同长径比, 就可查出相应的极限偏差 ΔT_{pp} , 然后在滚珠丝杠副动态转矩测量仪器上测得实际偏差 ΔT_{pa} 。正、反向的 $\Delta T_{pa} < \Delta T_{pp}$ 一致, 就可判定合格。但是这种检测只表明 F_{pr} 满足设计要求, ΔT_{pa} 没有超差, 至于柔顺性怎么样呢? 经实践检验和研究表明: 在国家标准 GB/T17587.3 和国际标准 ISO3408—3 中 ΔT_p 监控柔顺性存在失控的盲区, 具体表现在以下三方面:

①标准中所规定的测量转速, 正反向均为 100 r/min, 它不能反映低转速和微量进给状态下的力矩变化规律, 这不利于柔顺性的监控。

②上述标准只规定了在丝杠副有效行程范围内的允许变化范围, 属于大范围的“宏观调控”(见图 5)。

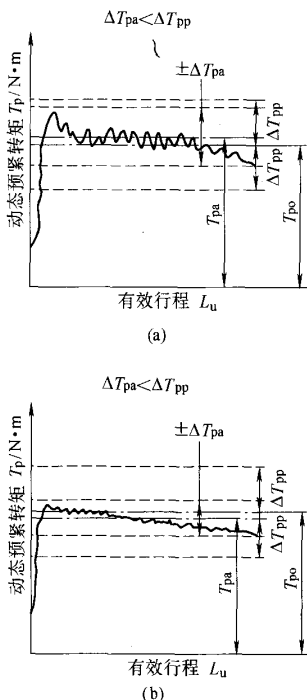


图 5 GB/T 17587.3 (E12 项) 动态空载预紧转矩检测示意图

T_{po} ——理论空载预紧转矩, N·m
 T_{pa} ——实际空载预紧转矩平均值, N·m
 ΔT_{pa} ——动态空载预紧转矩实测偏差, N·m
 ΔT_{pp} ——动态空载预紧转矩极限偏差, N·m

从图 5a 图 5b 两组动态转矩误差曲线可看出: 在一批尺寸规格相同、精度等级相同的产品中, 按照 GQ/T17987.3 第 E12 项检验, ΔT_{pa} 实际偏差都在允许范围内, 即 $\Delta T_{pa} < \Delta T_{pp}$, 虽然它们都符合“合格标准”, 但从图 5a 中看出, 力矩波动量是明显偏大, 柔顺性较差。这就是我们所说的柔顺性失控盲区。由此可以看出, 仅仅用 ΔT_p 指标考核, 不能全面真实地反映滚珠丝杠副的柔顺性。

③上述标准没有规定在低转速 (例如 $n \leq 4 \text{ r/min}$) 小范围的力矩变化。例如, 丝杠每转 (2π 弧度) 范围的力矩波动量, 我们用 δT_p 表示, 它类似导程误差中的周期误差。而正是这个微观监控指标 δT_p , 把柔顺性的定义予以量化, 便于统一认识, 便于操作执行, 便于检测判定 (见图 6)。

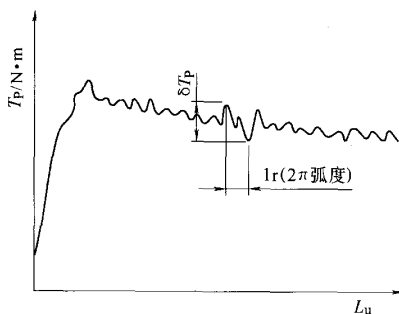


图 6 丝杠每转 (2π 弧度) 内力矩波动量 δT_p (最大值) 示意图

其实, 20 世纪 80 年代在前苏联的机床工具工业部标准 OCT·2P31—5—04《金属切削机床滚珠丝杠传动副技术条件》中, 除了规定空载动态转矩在全行程上的变动允差外, 还规定了丝杠每转空行程的矩波动量 (见表 4), 即我们说的 δT_p 。从表 4 可看出, 本文与前苏联的同行在 δT_p 问题上有共识。我国在 1987 年由北京机床研究所等单位制定的 JB/GQ1098—1987《滚珠丝杠副制造与验收技术要求》企业联合标准中也首次提出了用 δT_p 指标来控制滚珠丝杠副的灵活性和平衡性。表 4 中的力矩波动量可供检定时参考。

必须指出: 我国现有的力矩测量仪需要提高测量的灵敏度并在测量系统的软件 and 数据处理方面作必要的改进方能满足检测 δT_p 的要求。

(下转第 58 页)

潜在失效模式及后果分析

(过程 FMEA)

FMEA 编号: PFMEA/6370-3404172-2 编号: 04-0936-2004

项目/功能	潜在失效模式	潜在失效的后果	严重程度 S	级别	潜在失效的起因/机理	频度 O	现行控制		探测度 D	RPN	建议措施	措施结果				
							预防	探测				采取的措施	S	O	D	RPN
> φ31.64mm	上、下管柱压力装配值 > 1.67kN	1. 影响管柱压缩负荷	8	关键	1. 选材标准 GB/T8162—1999 规定的 ±0.25mm 径向公差	10	P	控制极限尺寸 φ31.64mm 与 φ31.56mm 的出现；降低频度级别，使其控制在 4~6 级之间	3	240	1. 更改选材标准，改用国外进口精轧管材	1. 设计 2A10/6370-	7	5	2	70
					2. 选材标准 GB/T8162—1999 规定的 ±10% 的壁厚公差						2. 设计专用凸点校正模具，控制两极限尺寸 φ31.64mm 与 φ31.56mm 的出现	3404172-4-00 凸点校正模				
< φ31.56mm	上、下管柱压力装配值 < 0.7kN	产品使用功能消失	8	关键	3. 选材标准 GB/T8162—1999 规定的 2mm/1000mm 弯曲率											

通过在冲压产品零件中学习使用《潜在失效模式及后果分析》法, 解决了冲压产品零件的关键重要工序过

程控制中的难题。

(收稿日期: 20050915)

(上接第 19 页)

表 4 “OCT.2P31—5—84” 前苏联部颁标准
对动态力矩规定

公称直径 d_0/mm	公称导程 P_h/mm	动态空载转矩 $N\cdot\text{m}$	丝杠每转空行程力矩 波动量/ $N\cdot\text{m}\leq$
20	5	0.08~0.16	0.05
25	5	0.10~0.26	0.10
32	5	0.20~0.50	0.50
32	6	0.21~0.45	0.15
40	5	0.33~0.82	0.28
40	6	0.30~0.76	0.25
40	10	0.25~0.63	0.20
50	5	0.52~1.30	0.30
50	6	0.50~1.20	0.30
50	10	0.46~1.14	0.30
50	12	0.45~0.98	0.30
63	10	0.78~1.95	0.40
80	10	1.28~3.21	0.50
80	20	1.04~2.61	0.50
100	10	2.08~5.20	0.60
100	20	2.10~5.24	0.7

此篇文章得到了黄祖尧老先生的指点, 在这里向他表示感谢。

(全文完) (收稿日期: 20050906)

信息

稿 约

各位读者朋友:

《机械工人》杂志是具有 56 年历史、在机械制造业具有很高知名度的一本科技刊物, 对模具制造行业一直颇为关注。我们除每期都有“模具”的栏目外, 曾以国际模具展等行业大的活动为契机做过多期关于模具的专题策划, 也曾和中国模协及电加工所合作搞“电加工设备应用调查”活动, 引起模协等专业组织和广大读者的广泛好评。2006 年我们将加大模具方面的报道量, 做几期相关的策划, 特别是将与中国模协合作, 为第 11 届国际模具展做一本全彩专刊, 除本刊的几万读者外还将在第 11 届模展上大量赠送, 将是广大模具工作者值得保留的一本精品期刊。今特别向您约稿, 请在来稿时写明您的个人详细通讯信息, 包括电话和身份证号码, 以便及时向您寄送稿费和样刊。

《机械工人》杂志社 邢海涛