

高速滚珠丝杠副的研发和测试技术

肖正义 焦 洁

(北京机床研究所, 北京 100102)

摘 要:介绍了北京机床研究所高速滚珠丝杠副的结构设计及其需注意的事项。介绍了高速滚珠丝杠副的综合行程误差、预紧转矩以及高速驱动动态特性(定位精度、温升、速度、加速度)的测量。

关键词:滚珠丝杠副 高速 定位精度 温升 速度 加速度 测量

Development and Test of High Speed Ball Screw Units

XIAO Zhengyi, JIAO Jie

(Beijing Machine Tool Research Institute, Beijing 100102, CHN)

Abstract: Research process of high speed ball screw units of Beijing Machine Tool Research Institute and points for paying attention on its design of structure are introduced. The measuring method of high speed ball screw units on travel deviation, preload drag torque and dynamic performance under high speed driving (such as accuracy of positioning, temperature variation, speed, acceleration) are described.

Keywords: Ball Screw units; High Speed; Accuracy of Positioning; Temperature Variation; Speed; Acceleration; Measure

现代制造技术的发展突飞猛进,一批又一批的高速数控机床应运而生。它不仅要求有性能卓越的高速主轴,而且也对进给系统提出了很高的要求:(1)最大进给速度应达到 40 m/min 或更高;(2)加速度要高,达到 1 g 以上;(3)动态性能要好,达到较高的定位精度。

高速滚珠丝杠副是指能适应高速化要求(40 m/min 以上)、满足承载要求且能精密定位的滚珠丝杠副,是实现数控机床高速化首选的传动与定位部件。

北京机床研究所在承担“九五”国家重点科技攻关项目“高速滚珠丝杠副测试技术及装置的开发研究”时,对高速滚珠丝杠副的结构、性能、制造技术、测量技术等进行了研究,并取得了阶段性成果。该项研究成果荣获中国机械工业科学技术进步三等奖。

1 高速滚珠丝杠副的结构设计

滚珠丝杠副的驱动速度 $V = P_h \times N$ (P_h 为导程, N 为丝杠转速),因此提高驱动速度的途径有两条:其一是提高丝杠的转速,其二是采用大导程。提高转速 N 受 $d_0 \cdot N$ 值的制约(d_0 为滚珠丝杠的公称直径)。国际上一般 $d_0 \cdot N \leq 70\,000$ 。据日本 NSK 公司介绍:该公司已将 $d_0 \cdot N$ 值提高到 153 000。 N 增大时, d_0 必须减小,且过分提高转速会引起丝杠发热、共振等问题; d_0 太小也会造成系统刚性差、易变形、影响加工精度,

且目前伺服电动机的最高转速仅到 4 000 r/min。导程 P_h 过大时,不仅增加了滚珠丝杠副的制造难度,精度难以提高,降低了丝杠副承载,而且也增加了伺服电动机的起动力矩。因此,设计高速滚珠丝杠副时要合理选择丝杠副的转速 N 、公称直径 d_0 与导程 P_h 。

数控机床常用的滚珠丝杠副结构为:外循环插管式、内循环反向器式。由于高速滚珠丝杠副的导程较大,如用内循环结构,反向器尺寸较长,承载的钢球数减少,且钢球高速时流畅性差,是不适合的;而外循环插管式结构简单,承载能力大,不受导程的限制。因此,被选作高速滚珠丝杠副的结构。

外循环滚珠丝杠副的预紧方式主要有三种:增大钢球直径、变位导程和垫片。各预紧方式的特点见表1。

表1 外循环滚珠丝杠副的预紧方式

预紧方式	丝杠副螺母数	特 点
增大钢球直径	1	丝杠副承载能力大。由于钢球 4 点接触,因而,摩擦阻力较大,易发热,小预加载荷时预紧转矩平稳。适合于小预加载荷、传递运动场合。
变位导程	1	钢球两点接触。由于只用一个螺母,消除因垫片或螺母制造误差而产生螺母的倾斜而影响预紧转矩。因此,预紧转矩平稳,但承载较小。适合于中预加载荷、有定位精度要求的场合。
垫片	2	钢球两点接触。丝杠副承载能力大,可施加较大预加载荷,小预加载荷时预紧转矩平稳。适合于高负载、有定位精度要求的场合。

根据高速滚珠丝杠副的特点,选用单螺母变位导程预紧结构比较合适。但在结构设计时,应注意以下几点:(1)导程的选择。为了提高丝杠副驱动速度,一般需增大丝杠副导程,常用丝杠副导程取丝杠直径的 $1/3 \sim 1/2$ 。(2)为了增加承载,选用多头螺纹,以提高丝杠副承载能力。(3)滚珠丝杠副在高速时产生的噪声主要来自钢球在导珠管进出口(见图1P、P'点)处的碰撞。因此,在循环过程中钢球的反向点设计是非常重要的(见图1),要合理选取反向角 α 。

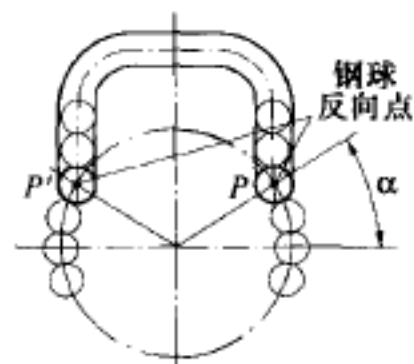
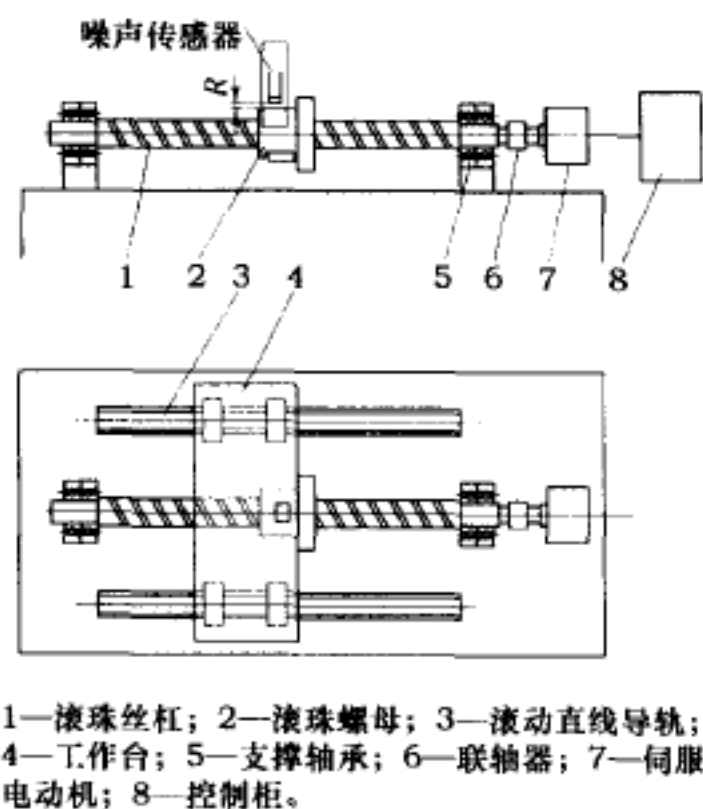


图1 钢球反向点示意图

2 高速滚珠丝杠副的测试技术

测量和制造是密不可分的,没有测量,产品质量就没有保证。北京机床研究所自研究生产丝杠开始,就着手研制丝杠测量仪器。并先后研制成功了“JCS-014 两米激光丝杠导程误差检查仪(以下简称JCS-014)”、“JCS-040 三米激光滚珠丝杠副行程误差测量仪(以下简称JCS-040)”、“LJY10 滚珠丝杠副动态预紧转矩测量仪(以下简称LJY10)”。这些仪器均采用了高精度的传感器和现代化的测试手段。其数据处理遵循的标准是:GB/T 17587.3—1998 滚珠丝杠副验收条件及验收检验。国内丝杠生产厂家主要使用以上仪器。北京机床所生产的滚珠丝杠副都是在这些仪器上进行检测的。通过对测量结果进行分析,提出质量反馈意见,促进建立稳定可靠的工艺系统,从而提高产品质量和生产率。北京机床所出口的滚珠丝杠副检测结果也得到了国外有关公司的认可。



1—滚珠丝杠; 2—滚珠螺母; 3—滚动直线导轨; 4—工作台; 5—支撑轴承; 6—联轴器; 7—伺服电动机; 8—控制柜。

图2 GSZ 2000 传动系统示意图

为了对滚珠丝杠副进行高速试验,北京机床所专门研制成功了GSZ 2000 高速滚珠丝杠副综合测试装置(见图2)。用于测量滚珠丝杠副在高速时的性能——定位精度、噪声和温升,测量丝杠最大长度为2 200 mm,工作台移动速度可达60 m/min 以上。该测试装置配置了日本三菱公司的高分辨率的单轴数控系统,其中交流伺服电动机的额定功率为2 kW,额定转速为3 000 r/min,电动机端编码器输出的脉冲数为100 000/r。

采用了德国 HEIDENHAIN 精密长光栅副作为定位精度的测量基准,其测量分辨率为0.2 μm ;采用6个PN结温度传感器,分别测量螺母、丝杠、前轴承座、后轴承座、光栅和空气的温度,其测量分辨率为0.1 $^{\circ}\text{C}$;采用智能声级计测量滚珠丝杠副噪声的声压级,其测量分辨率为0.5 dB。

下面介绍高速试验情况,被测滚珠丝杠副的参数见表2。在“JCS-040”上测量结果见图3,在“LJY10”上测量结果见图4。

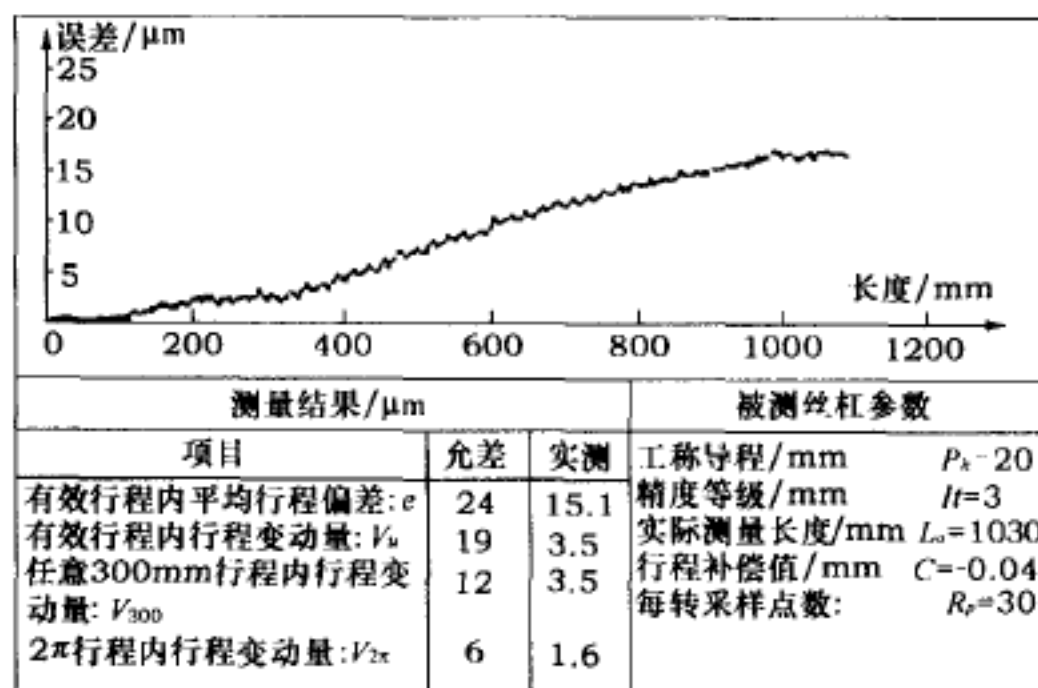


图3 滚珠丝杠副行程误差曲线与数据

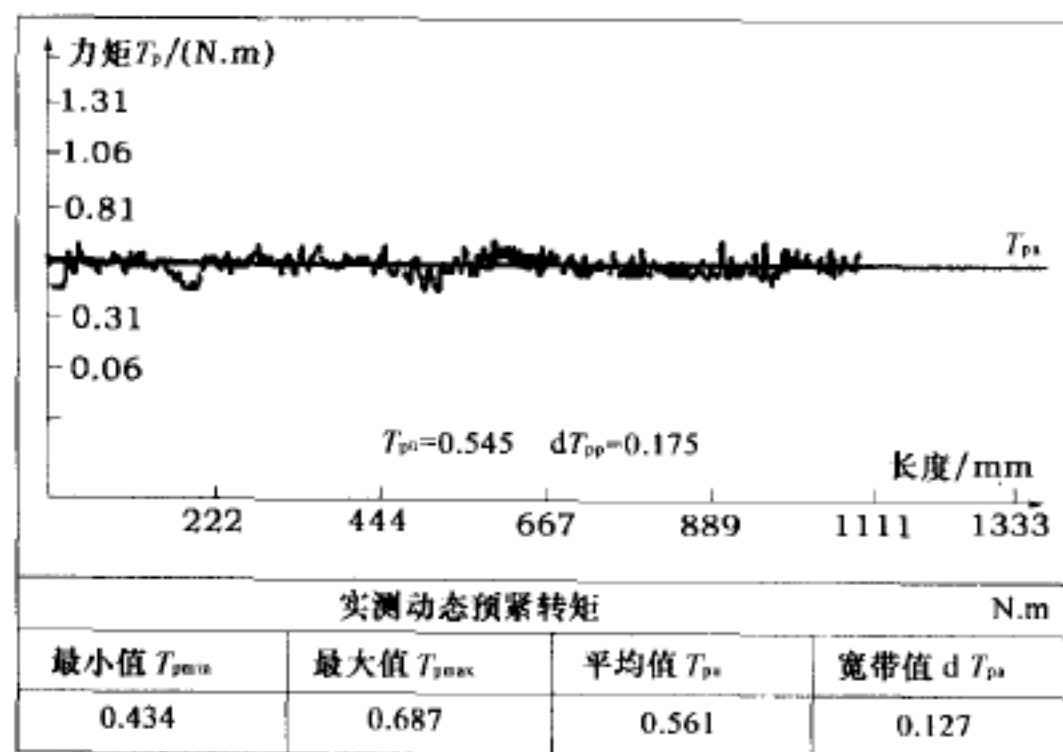


图4 滚珠丝杠副预紧转矩曲线与数据

表2 被测滚珠丝杠副参数

公称直径/mm	d_0	40
导程/mm	P_h	20
丝杠总长/mm	L	1 600
精度等级	P	2
方向目标值/mm	C	-0.04
滚珠丝杠副预紧转矩/N·m	M_f	0.434~0.687
滚珠丝杠副预拉伸量/mm	λ	0.05
工作台重/kg	W	240

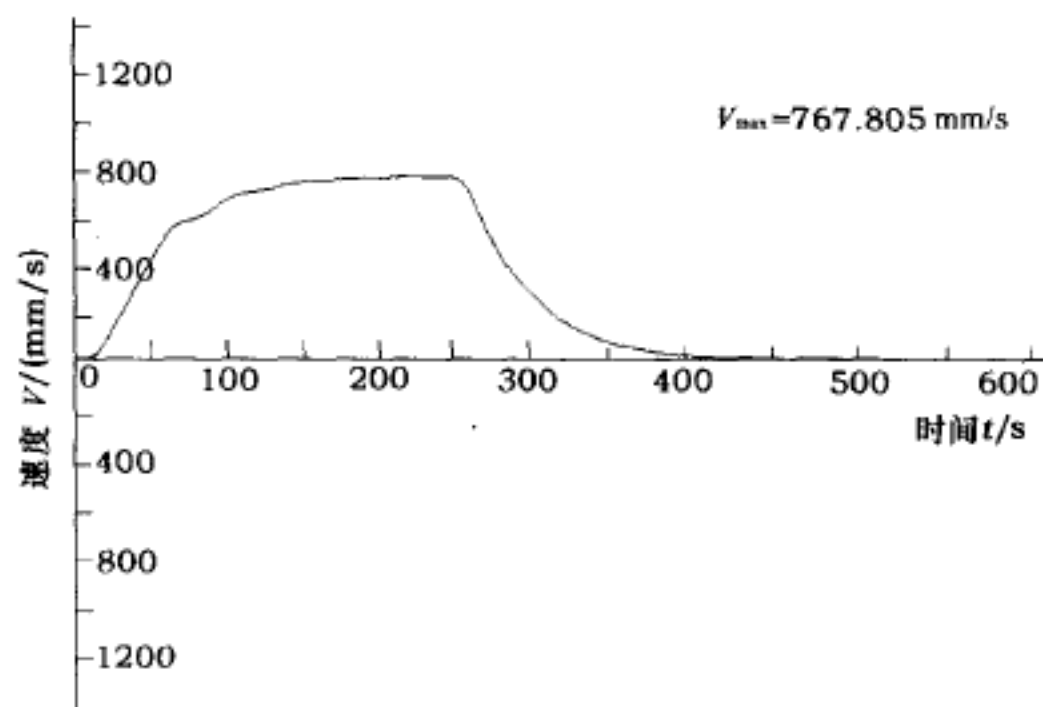


图5 在指数运动方式下的速度与时间的关系

(1)动态测试 利用GSZ 2000装置上的长光栅传感器进行动态采数,可以检查运动速度的平稳性及

加速度的跃升与过冲(参见图5、6)。设 ΔS 为在时间 Δt 内位移的变化量,则:运动的速度 $V = \Delta S / \Delta t$,加速度 $a = \Delta V / \Delta t$,这里取 $\Delta t = 1/640$ s。

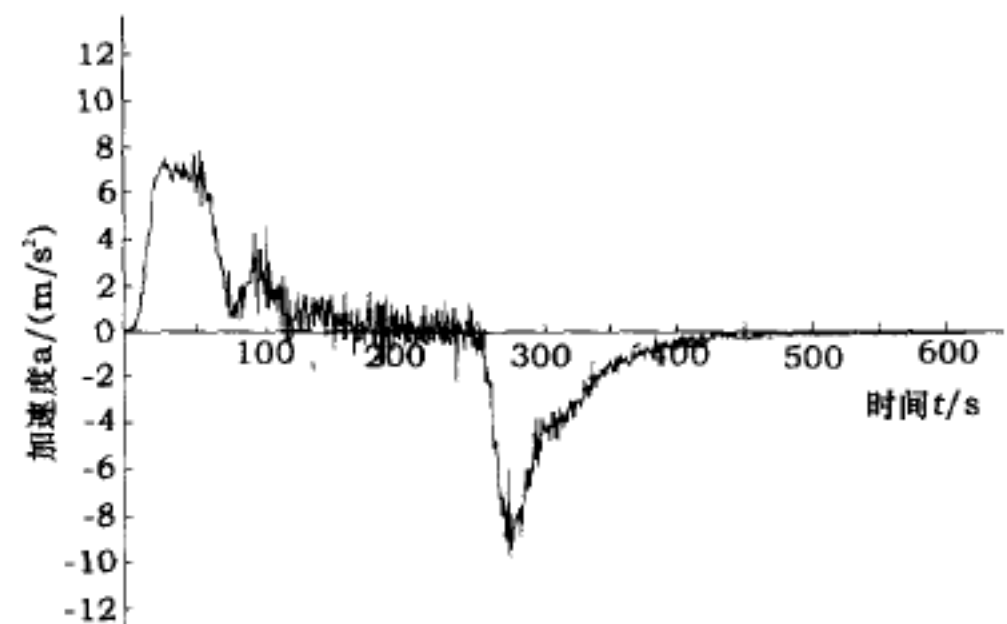


图6 在指数运动方式下的加速度与时间的关系

(2)定位精度测量 对高速滚珠丝杠副定位精度评价的标准是:GB/T 17421.2-2000在表3的测试条件下,测量结果见表4、表5和图7。

(3)温升测试 测量结果见图8、9。

表3 测试条件

移动速度	60 m/min	轴线行程	960 mm	测量行程	910 mm
循环方式	线性	温度条件	环境温度	丝杠温度	光栅温度
循环周期	5	开始	23.0℃	24.2℃	23.3℃
间歇时间	5 s	结束	23.3℃	24.5℃	23.5℃

表4 工作台移动速度为60 m/min时,位置偏差的数据与计算

偏差 P_i /mm	101.013		303.039		505.065		707.091		909.117	
趋近方向	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
位置偏差 $X_{ij}/\mu\text{m}$ $j=1$	0.4	3.4	-1.0	1.4	-2.2	0.2	-3.6	-0.6	-7.4	-3.4
$=2$	0.2	3.6	-1.2	1.4	-2.0	0.0	-3.4	-0.4	-7.0	-3.4
$=3$	0.6	3.8	-0.8	1.6	-1.8	0.2	-3.2	-0.4	-6.8	-3.0
$=4$	0.6	3.6	-1.0	1.6	-2.0	0.6	-3.0	-0.6	-6.6	-3.0
$=5$	0.6	3.4	-1.0	1.6	-2.0	0.4	-2.8	-0.4	-6.8	-3.0
单向平均位置偏差 $\bar{X}_i/\mu\text{m}$	0.5	3.6	-1.0	1.5	-2.0	0.3	-3.2	-0.5	-6.9	-3.2
标准不确定度 $S_i/\mu\text{m}$	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2
$2S_i/\mu\text{m}$	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.2	0.6	0.4
单向重复定位偏差/ μm $R_i=4S_i$	0.7	0.7	0.6	0.4	0.6	0.9	1.3	0.4	1.2	0.9
\bar{X}_i+2S_i	0.8	3.9	-0.7	1.7	-1.7	0.7	-2.6	-0.3	-6.3	-2.7
\bar{X}_i-2S_i	0.1	3.2	-1.3	1.3	-2.3	-0.2	-3.8	-0.7	-7.5	-3.6
反向差值/ μm $B_i=\bar{X}_i\uparrow-\bar{X}_i\downarrow$	-3.1		-1.6		-2.3		-2.7		-3.8	
双向平均位置偏差/ μm $\bar{X}_i=(\bar{X}_i\uparrow+\bar{X}_i\downarrow)/2$	2.0		0.7		-0.9		-1.8		-5.0	
双向重复定位精度/ μm $2S_i\uparrow+2S_i\downarrow+ B_i $	3.8		2.1		3.0		3.6		4.8	

注:↑表示正向趋近,↓表示负向趋近, i 为目标位置序号, j 为测量次数, X_{ij} 为第 j 次趋近第 i 个目标时的位置。

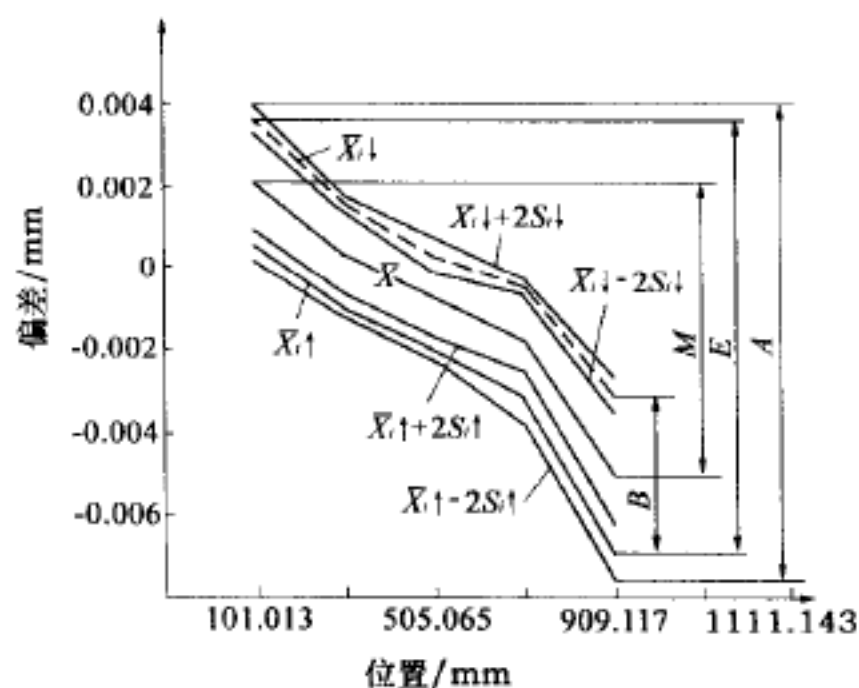


图7 定位精度曲线

表5 定位精度的检测结果

测量名称	实测值/mm
双向定位精度 A	0.011
定位精度(正向) $A \uparrow$	0.008
定位精度(负向) $A \downarrow$	0.008
双向重复定位精度 R	0.005
重复定位精度(正向) $R \uparrow$	0.001
重复定位精度(负向) $R \downarrow$	0.009
轴线的反向差值 B	0.004
平均反向差值 \bar{B}	-0.003
双向定位系统偏差 E	0.011
定位系统偏差(正向) $E \uparrow$	0.007
定位系统偏差(负向) $E \downarrow$	0.007
轴线的平均双向位置偏差范围 M	0.007

3 总结

通过对高速试验与研究分析,我们对滚珠丝杠副在高速时的定位精度、加速度、温升、振动和噪声等有了更进一步的了解。并根据这些测试结果对高速滚珠丝杠副的结构及工艺进行了改进,取得了一定的效果。

目前试制的滚珠丝杠副的 $d_0 \cdot N$ 值可达 120 000,快移速度可达 60 m/min,加速度可达 1 g。其中规格为:直径 $\phi 40$ mm、导程 16 mm 的滚珠丝杠副已被应用到我所生产的 KT1300V 立式加工中心上,其快移速度达 48 m/min 时,定位精度也能满足数控机床的要求。

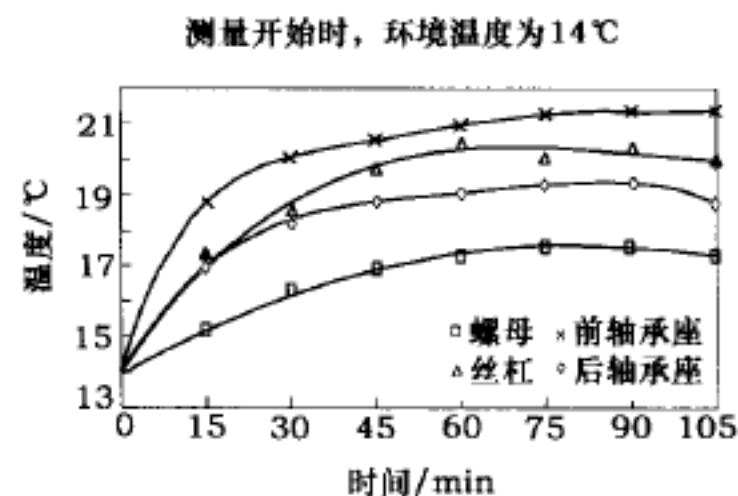


图8 移动速度60m/min时各布测点的温升曲线

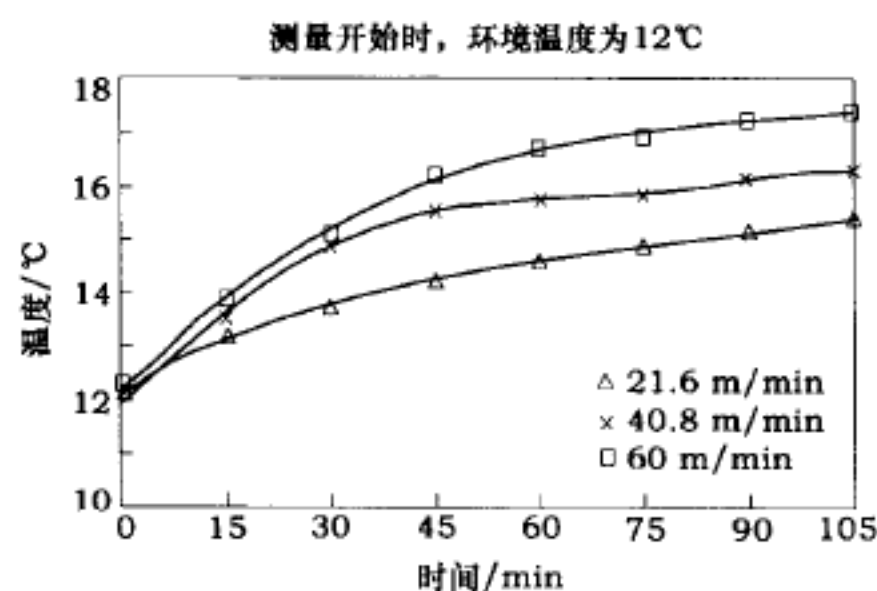


图9 在不同速度下滚珠丝杠的温度曲线

由于我们对高速滚珠丝杠副的研究时间还不长,还有大量的试验需要做。通过试验积累经验,为制造高质量的高速滚珠丝杠副奠定基础。

第一作者:肖正义,北京机床研究所精密部,邮编:100102

(编辑 徐洁兰)

(收稿日期:2003-11-12)

文章编号:4434

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

· 书讯 ·

《机床电路故障的诊断与修理》

定价:15.00 元

本书系统全面地分析了机床电路故障产生的原因、介绍了排除故障的方法、实用性强。全书包括机床维修的方法及步骤,典型电路环节的故障诊断与修理、典型机床故障诊断与修理、数控机床的故障诊断与修理、机床电路修理质量要求等五章。

《机床电气设备的维修》 刘光源 编著

定价:12.00 元

本书是《电工实用技术丛书》中的一本。它先介绍了常用低压电器的选用、安装、检修及同类型的替换,又系统介绍了交直流电动机的一般电气控制线路的构成和百年不遇及各电器所起作用,最后分析了机床电气控制线路的检修方法并列举十余种典型、实用耐磨线路的维修实例。本书以深入浅出、结合初中为特色,注重引导读者一步步学习如何独立解决总量并且全书采用最新的图形文字符号标准。

来款请寄北京市朝阳区东直门外望京路4号,邮编:100102,机床杂志社收。