

精密步进滚珠丝杠副的研制

赵 明 晶

摘要：本文主要阐述精密步进滚珠丝杠副的工作原理、结构设计、制造工艺及精度检验。

本文阐述的步进滚珠丝杠副已应用于北京质子加速器的束流测量系统中。步距为0.5mm；步距精度为0.01mm；步进速度为6mm/s。该滚珠丝杠副是双螺母外循环方式的，循环组数为1组2.5圈。丝杠直径为20.5mm；导程为5mm；滚珠直径为3.175mm；定位精度为4.7 μ m；复位精度为2.0 μ m。

一、前 言

滚珠丝杠副的应用出现于四十年代。其特点是在丝杠与螺母之间置入滚珠，将滑动摩擦代之以滚动摩擦，因此具有摩擦小、效率高、起动力矩小、承载能力大、反应灵敏、定位精度高等优点。目前已广泛地应用于数控机床、步进系统、光学仪器、雷达、航空以及天体望远镜等方面。例如，阿波罗飞行模拟器全重9吨，就是用一根滚珠丝杠举起的。

本文阐述的步进滚珠丝杠副是按照日本NSK公司的结构设计的。它已成功地用于10Mev北京质子直线加速器的束流测量系统中。自1982年工作以来，性能良好可靠。实践表明，起动灵活，传动平稳，定位准确。文中阐述的结构设计与制造工艺对滚珠丝杠副的设计与研制可供参考。

二、技术 指 标

总行程： $S_t = 100\text{mm}$

工作行程： $S_w = 40 \pm 0.1\text{mm}$

工作行程步距： $P_s = 0.5 \pm 0.02\text{mm}$

步进速度： $V_s = 6\text{mm/s}$

步进电机型号： $BFG090411$

电机步距角： $\delta_s = 0.75^\circ$

电机力矩： $M_m = 392\text{N}\cdot\text{cm}$

工作频率： $f_w = 240\text{Hz}$

三、传动原理

步进滚珠丝杠副的传动原理如图1所示，由步进电机驱动，通过齿轮升速，带动滚珠丝杠副做步进移动。其参数计算如下：

$$n_m = \frac{\delta_s f_s}{360^\circ} = \frac{0.75 \times 240}{360^\circ} = 0.5 \text{ r/s}$$

$$t_s = \frac{v_s i_r}{n_m} = \frac{6 \times 0.4166}{0.5} = 5 \text{ mm}$$

式中 t_s ——滚珠丝杠副的导程;
 n_m ——步进电机平均转速;
 δ_s ——步进电机步距角;
 f_s ——步进电机工作频率;
 v_s ——螺母的步进速度;
 i_r ——齿轮副传动比, $i_r = 0.4166$ 。

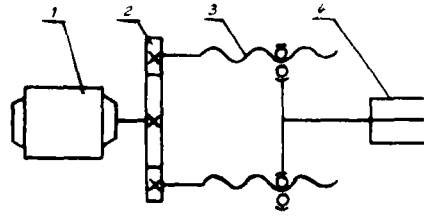


图1 步进滚珠丝杠副的传动原理

- 1—步进电机 2—齿轮副
 3—滚珠丝杠副 4—探测头

四、结构设计

滚珠丝杠副有内循环与外循环两种结构形式。内循环滚珠丝杠副的工作原理如图 2a 所示, 滚珠是在丝杠与螺母间沿螺旋滚道运行, 当滚珠由螺母始端运动到末端后, 由于反向器上的回珠槽的控制, 可使滚珠越过丝杠齿顶重新返回始端进行循环。这种结构, 一组滚珠只能做一圈循环, 一般常采用 2 组或 3 组滚珠。外循环滚珠丝杠副的工作原理如图 2b 所示, 当

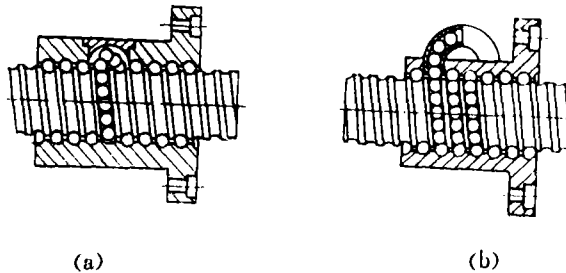


图2 滚珠丝杠副的工作原理

表1 滚珠丝杠副的结构参数与技术要求

	项 目	数 值
结构参数	外 径	$d_o = 20.5 \text{ mm}$
	导 程	$t_s = 5 \text{ mm}$
	头 数	$z = 1$
	滚 珠 直 径	$d_b = 3.175 \text{ mm}$
	旋 向	右 旋
	循 环 方 式	外 循 环
技术要求	循 环 组 数	1 组 2.5^∇
	离子氮化深度	$h = 0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$
	硬 度	$HR_c = 62 \sim 65$
	粗 糙 度	$0.2/\nabla$
	滚珠循环要求	消间隙、流畅
	精 度 等 级	c 级

滚珠由螺母始端运动到末端后，在挡珠器的控制下，使滚珠沿螺旋滚道的切线方向离开螺母体，通过回珠管再返回到螺母体始端，重新进行循环。这种结构，一组滚珠可做1.5、2.5、3.5圈循环。一般常采用2.5圈或3.5圈的滚珠循环。本文阐述的滚珠丝杠副为外循环方式的。其结构如图3所示，结构参数与技术要求列于表1，螺母的结构示于图4。

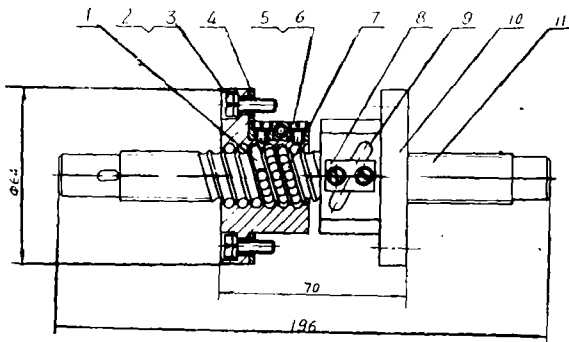


图3 双螺母消间隙外循环滚珠丝杠副的结构

- 1—挡珠器 2—螺钉 3—弹簧垫圈 4—调整垫片
- 5—螺钉 6—弹簧垫圈 7—滚珠 8—压块
- 9—回珠管 10—滚珠螺母 11—滚珠丝杠

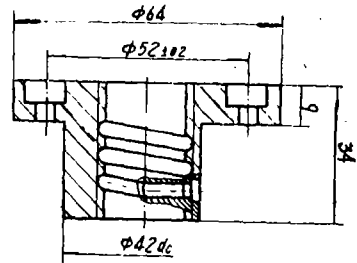


图4 滚珠螺母的结构

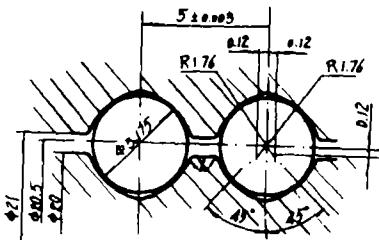


图5 丝杠与螺母的螺纹法向齿形

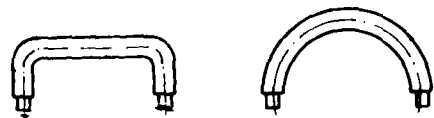


图6 回珠管的结构形式
平顶式(左),圆顶式(右)

丝杠与螺母的螺纹齿形如图5所示，均采用双圆弧齿形，接触角为45°。采用这种齿形接触稳定，运转平滑，并能存油和避免齿面研伤。

外循环滚珠丝杠副的回珠管可有平顶与圆顶两种结构形式(图6)。平顶回珠管结构简单，但制造麻烦，需采用冲压方法冲出两个半管后再合成一个整管。圆顶回珠管，制造简单，可用普通车削方法加工出一个整圆的半管，然后将一个整圆分成两个半圆，再合成一个半圆顶的整管。两者均能保证管路内径尺寸均匀一致和拐角过渡圆滑，可使滚珠循环流畅不产生滞涩或跳动现象。实践证明，若采用管材弯成平顶或圆顶的回珠管，其内径尺寸不易保证一致，不宜采用。

螺母中的挡珠器因受力不大，可采用粘结方法固定。这种方法比机械固定方法简单，且能保证位置准确，实践证明，牢度可靠，宜于采用。

五、材料与热处理

滚珠丝杠副各零件的材料及其热处理列于表2。对于高精度滚珠丝杠副的零件可以采用定性处理和冷处理方法来提高其稳定性。

本文阐述的滚珠丝杠副是采用38CrMoAl氮化钢。因为小型滚珠丝杠副需采用研磨工艺，而这种钢氮化处理变形小，硬度高，加工余量小，适于研磨加工。

六、制造工艺

小型滚珠丝杠副的制造工艺较为复杂，特别是对于直径小于20mm的螺母，采用磨削法加工螺纹滚道是困难的。这主要受砂轮直径的限制。基于此，这里采用了精车、粗研、氮化、精研的工艺方法。实践表明，这种工艺是可行的。现将图4所示的螺母的制造工艺列于表3。

表2 滚珠丝杠副各零件的材料及热处理

	材 料	热 处 理 与 硬 度
丝 杠	G Cr15 Cr W Mn 9Mn 2V 38Cr Mo Al	淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 离子氮化 $h = 0.4 \sim 0.6\text{mm}$ $HR_c = 62 \sim 65$
螺 母	G Cr 15 Cr W Mn 9Cr Si 38Cr Mo Al	淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 淬火 $HR_c = 60 \sim 62$ 离子氮化 $h = 0.4 \sim 0.6\text{mm}$ $HR_c = 62 \sim 65$
挡 珠 器	65Mn 钢丝	冷卷后回火
回 珠 管	H62 聚 矾	

表3 螺母的制造工艺

零件名称	滚 珠 螺 母	件 号	
材 料	38CrMoAl	数 量	
简 图	见图4		
序号	工 种	工 序 内 容	设备与工具
1	下 料	下料尺寸 $\phi 70 \times 40$	锯 床
2	粗 车	粗车各表面，均留2mm留量	普通车床
3	热	调质处理 $HR_c 28 \sim 32$ (1) 加热到 $900 \sim 940^\circ\text{C}$ 保温2小时油淬 (2) 640°C 高温回火	

4	半精车	(1) 车 $\phi 64$ 外圆及两侧端面均至图纸尺寸 (2) 车其余内外圆表面及端面, 留磨量为 0.1mm	DL ₂ 精密螺丝车床
5	铣	在 $\phi 42$ 外圆上铣平面至图纸尺寸	万能立式铣床
6	镗	(1) 钻镗 $2-\phi 3.26$ 两回珠孔至图纸尺寸 (2) 钻镗 $2-\phi 4$ 两沉孔至图纸尺寸	座标镗床
7	钳	(1) 钻法兰上 $4-\phi 5.5$ 孔及其沉孔均至图纸尺寸 (2) 钻孔攻丝 $2-M3$ (参看图 3)	钻床
8	磨	以 $\phi 21$ 内孔定位磨 $\phi 42$ 外圆及其端面均至图纸尺寸	外圆磨床
9	精车	以 $\phi 42$ 外圆定位精车内螺纹表面, 留研量 0.03mm	DL ₂ 精密螺丝车床
10	热	稳定处理, 200°C 油煮 8 小时空冷	
11	钳	修整 $2-\phi 3.26$ 回珠孔, 保证同内螺纹滚道相切处圆滑过渡	
12	粗研	采用专制研具研磨内螺纹表面, 留精研量 0.01mm	专用内螺纹研具
13	热	氮化处理, 深度 0.4mm , 硬度 $HR_c 62\sim 65$	
14	精研	精研内螺纹表面及两回珠孔至图纸尺寸	专用内螺纹研具
15	检查	按图纸要求检测精度	滚刀检查仪, 测长仪, 万能工具显微镜

七、精度检验

滚珠丝杠与螺母的精度检验是在东德蔡司厂生产的滚刀检查仪、万能工具显微镜和卧式测长仪上进行的。检测结果列于表 4。滚珠丝杠副的精度检测结果列于表 5。

表 4 滚珠丝杠和螺母的精度检测结果

单位 μm

	检测项目	精度指标	检测结果
丝	螺距误差	± 3	+ 1.3
	300mm内螺距累积误差	6	5.7
	螺纹齿形误差	6	1.0
	椭圆度	3	2.9
杠	名义直径锥度	4	2.7
	径向振摆	6	3.0
	螺纹表面粗糙度	0.2/ ∇	0.2/ ∇

螺	螺距误差	± 4	-1.3
	有效长度内螺距累积误差	6	2.2
母	螺纹齿形误差	6	—
	椭圆度	5	2.0
	名义直径锥度	2	1.8
	螺纹表面粗糙度	0.2/ ∇	0.2/ ∇

表 5 滚珠丝杠副的精度检测结果

单位 μm

检 测 项 目	精 度 指 标	检 测 结 果
定 位 精 度	—	4.7
复 位 精 度	—	2.0
步 进 精 度	± 20	10.0

参 考 文 献

- [1] 机床情报, 滚珠丝杠译文集, 北京机床研究所, 1973.
- [2] 内循环滚珠丝杠副, 北京机床研究所产品目录.
- [3] NSK Precision Ball Screws Nippon Seiko K.K.Pr., No.21306.

Fabrication of Precision Stepper Ball Screw Nut

Zhao Mingjing

Abstract

This paper describes the working theory, construction design, technology rules and inspection accuracy of the precision stepper ball screw nut.

The stepper ball screw nut has been used in a beam monitor system of Beijing proton synchrotron. The step is 0.5mm; the step accuracy 0.01mm; the step velocity 6mm/s. The screw nut is of double nut tube type which is single tube 2.5 circuits. The screw shaft diameter is 20.5mm; the lead 5mm; the ball diameter 3.175mm; the position accuracy 4.7 μm ; the repeat position accuracy 2.0 μm .