

# 滚珠丝杆导程误差动态检测仪及其系统误差修正研究

肖沙里 陈 骥 杨世雄 余 红  
(重庆大学光电精密仪器系, 重庆 630044)

**摘要** 采用误差修正技术,提高仪器检测精度,是精密工程中重要的技术之一。本文介绍一种用微机控制和误差修正补偿技术的精密丝杆导程动态检测仪,对这一技术的工作原理、系统结构、接口电路、误差分析与实验结果进行了研究。

**关键词:** 导程检测; 动态测量; 误差修正

## 1 引 言

在研究精密测量技术中,为提高其精度,过去人们往往把注意力放在其结构布局及研究寻找具有高性能的优良基础部件上,这种方法成本高、周期长,工程应用的价格性能比差,近年来随着计算机技术的发展和运用,利用误差修正技术来提高加工母机和检测仪精度的应用越来越广泛,这种方法大幅度地提高了仪器精度和具有显著的经济效益,受到人们极大重视,应用微机修正误差已成为当今研究精密机械加工和检测的重要手段,在采用系统误差修正技术来提高滚珠丝杆导程误差修正技术来提高滚珠丝杆导程误差检测仪精度的应用中,收到较好的预期效果,成功地研制出一台可满足测量C级精度标准的滚珠丝杆导程误差检测仪。该检测仪用长光栅位移传感器和圆光栅角位移传感器作为长度和角度的标准量,应用位移量同步比较原理进行测量,由计算机完成动态采样,数据分析处理并计算出螺旋线误差,其本导程误差,导程误差曲线带宽等,测量结果可打印数据,作出误差曲线图或显示在计算机屏幕上,以便进行误差评定和频谱分析。

## 2 工作原理及其测量方法

螺旋线误差动态测量的基本原理是根据螺旋线的形成机理,可用如下公式表示:

$$\frac{T}{2\pi} = \frac{L}{\theta}$$

则  $L = \theta T / 2\pi$

式中  $T$ ——丝杆的导程,  
 $\theta$ ——丝杆转过的角度,

$L$ ——丝杆转过  $\theta$  角时,螺旋线的理想轴向位移。

由一角度标准量反映丝杆的转角  $\theta$  得到其理想的轴向位移  $L$ ,再有长度标准量反映丝杆在  $\theta$  角时相应的实际轴向位移  $L'$  两者之差便是丝杆螺旋误差  $\Delta L$ 。

$$\Delta L = L' - L = L' - T\theta/2\pi$$

为此我们用高精度圆光栅和长光栅分别作为角度和长度的传感器,检测仪主要组成框图如图 1 所示:

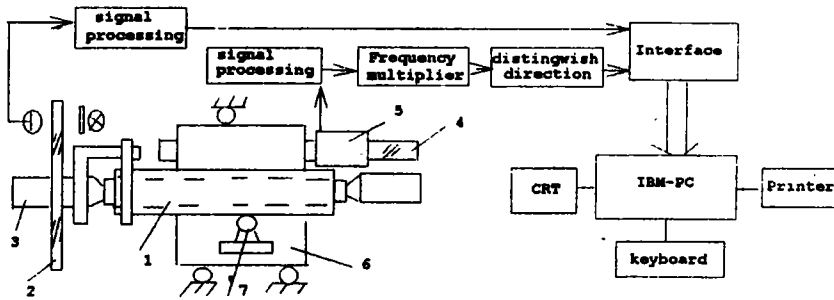


图 1 丝杆导程误差动态检测仪框图

Fig. 1 The sketch of instrument which measuring lead errors of ball screws

被测丝杆 1 在测量仪器上用前后顶针定位,直流伺服电机通过减速机构带动主轴 3 和圆光栅 2 同步旋转,高精度长光栅位移传感器 4 安装在床身上,光栅读数头 5 与工作台 6 固定在一起,工作台上装有与丝杆滚珠直径相同的圆柱测头或球形测头 7。本检测仪采用直线滚动导轨,具有较高运动精度和平稳性,测量时当丝杆转过  $\theta$  角,产生与其对应的莫尔条纹光电信号,经信号处理电路后形成计数脉冲,主轴经拨杆带动被测丝杆旋转,通过测头带动工作台沿直线导轨运动,使光栅读数头相对长光栅尺作直线运动,产生直线位移莫尔条纹光电信号,该信号经信号处理电路放大,整形并经过倍频、判向电路后形成与位移方向对应的正反向计数脉冲,这两路脉冲与角位移计数脉冲经计算机接口送入计算机进行数据处理。计算导程误差和实现修正补偿,达到提高检测精度的目的。

### 3 计算机接口电路与信号处理

检测仪采用 IBM-PC 微型计算机进行数据采集和处理,其电路原理如图 2 所示:

长光栅采用 50 线/mm 线纹尺,经 40 倍频电路,获得为  $0.5\mu\text{m}$  的脉冲当量,经判向电路后两路脉冲分别送入正反向计数器 1、2 采用正反向计数是为监测和减少轴向窜动带来的误差,圆光栅角位移传感器产生的角位移计数脉冲进入计数器 3 和测量起始点计数器 4,计数器 4 控制计数器 1、2、3 在给定的起始点同步开始计数,计数器 3 在测量过程中准确地按给定采样间隔  $\delta\theta$  通过 8259 可编程中断控制器向计算机 cpu 发出采样中断请求信号 INT,中断服务程序将计数器 1、2、3 中与当前  $\theta$  角对应的实际计数值锁存,然后将计数值读入内存进行数据处理,根据测量值便可计算出滚珠丝杆的各项误差值。为了便于重复精度的测量,我们可利用光栅绝对零位信号作为同一起始点信号,进行多次测量,以获取重复精度的数据,也可作为误

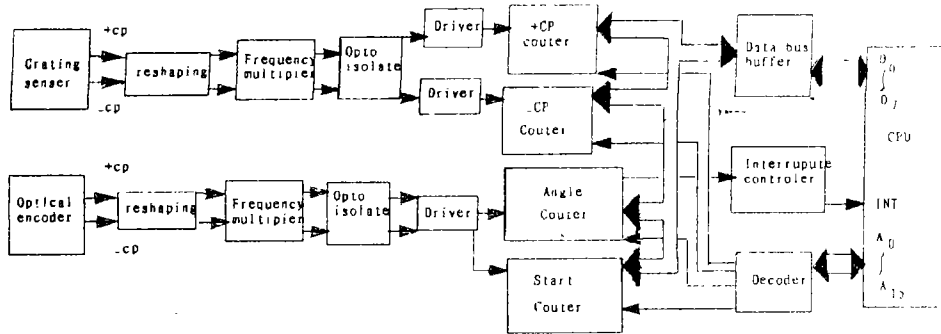


图2 计算机接口及其电路框图

Fig. 2 The computer interface and electronic circuits sketch

差修正的参考点,对任意测量位置的误差进行修正。用 8253 可编程计数器只需改变计数器 3 的计数值,便可按不同采样间隔测量丝杆导程误差和测量不同螺距的丝杆。

#### 4 仪器误差测量与误差修正

仪器误差的测量是误差修正补偿的前提,我们可直接测量最终误差或测量影响定位误差的误差源,通过误差修正来提高精度,有效的方法是在仪器测量范围内选择有限个测量点,用高精度仪器测定其实际误差,将这些误差数据存入误差数据库,以便修正时调用。若需对非检测点进行误差补偿,可对测到的原始误差值进行样条插值,便可得到所需测量点的误差补偿值,我们用 HP—5528 双频激光干涉仪对长光栅部件的误差以及直线导轨的直线度误差进行测量,找出其误差和修正作用点之间的关系,根据这些离散点用数学工具拟合误差曲线,建立相应的数学模型,再由计算机按一定程序对仪器的误差进行修正。一种典型的误差修正系统如图 3 所示:

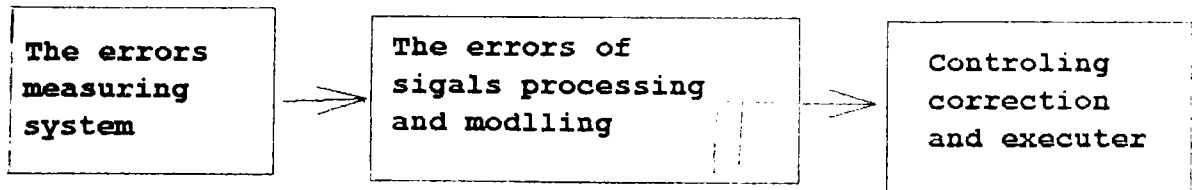


图3 误差修正系统框图

Fig. 3 The sketch of correcting errors system

本仪器系统重复性较好,系统性误差占有较大比重,因而补偿系统性误差能明显提高仪器精度,影响检测仪精度主要误差因素有:

1. 长光栅位移传感器栅线误差  $\delta L_1$

用 HP—5528 双频激光干涉仪实测误差为  $\delta L_1 = 28\mu\text{m}/300\text{mm}$ 。

2. 温度影响产生的误差:  $\delta L_2$

$$\delta L_2 = \pm \sqrt{\Delta\alpha^2 \Delta T^2 + \alpha_0^2 \Delta t^2} \cdot L$$

式中  $\Delta\alpha$ ——被测丝杆与光栅尺线膨胀系数差:  $\Delta\alpha = 1.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

$\Delta T$ ——测量温度与  $20^\circ\text{C}$  的最大差值:  $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$

$\Delta t$ ——被测丝杆与光栅尺的温差  $\Delta t = \pm 0.5^\circ\text{C}$

$L, \alpha_2$ ——被测丝杆长度与线膨胀系数:  $L = 300\text{mm}, \alpha_2 = 11.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

则有:  $\delta L_2 = \pm 1.95\mu\text{m}$

### 3. 阿贝误差:

导轨在水平和垂直方向的直线误差最大分别为  $\alpha = 7.5'', \beta = 6.2''$ , 因结构原因传感器轴线在水平面和垂直面偏离被测丝杆轴线距离分别为:  $h_1 = 100\text{mm}, h_2 = 95\text{mm}$ , 则产生的测量误差分别为:

$$\delta L_{3\alpha} = h_1 \tan \alpha = 3.6\mu\text{m}$$

$$\delta L_{3\beta} = h_2 \tan \beta = 2.8\mu\text{m}$$

### 4. 圆光栅位移传感器的栅线位置误差所引起的测量误差: $\delta L_4$

当选用准确度为:  $\theta_{p-p} = 30''$  的圆光栅, 根据其误差传递函数

$$\partial f / \partial \theta = T / 2\pi$$

则产生的测量误差为:

$$\delta L_4 = T / 2\pi \cdot \delta \theta$$

当螺距  $t = 14\text{mm}$  时,

$$\delta L_4 = \pm 0.324\mu\text{m}$$

### 5. 前后顶尖偏置引起的误差 $\delta L_5$ :

若前后顶尖连线与标准量的方向或所在平面不平行或不垂直, 就会产生转角定位误差. 如图 4 所示, 产生的转角定位误差为:

$$\delta \theta = \frac{B\alpha}{R} \sin \theta + \left( \frac{1}{4} + \frac{B^2}{2R^2} \right) \alpha^2 \sin(2\theta)$$

对应的测量误差:  $\delta L_5 = \frac{T}{2\pi} \cdot \delta \theta$

当 300mm 量程两顶尖偏置量为  $15\mu\text{m}$ , 对应夹角  $\alpha = 10.3'', R = 5\text{mm}, B = 25\text{mm}$ , 求得  $\delta \theta$  的最大值  $\theta_{\max} = 30''$ , 产生的测量误差为:

$$\delta L_5 = 0.34\mu\text{m}$$

以上几项误差是仪器的主要误差源, 当对仪器 1, 2, 3 项已定系统误差进行修正后, 由于高精度检测仪自身不确定度的存在, 其误差值按高精度检测仪不确定度考虑. 双频激光干涉仪测长系统精度为:

$\delta L_1 = \pm 0.45\mu\text{m}/300\text{mm}$ , 测角精度为  $\Delta \alpha = \Delta \beta = \pm 0.2''$ ,

则:  $\delta L_1 = \pm 0.45\mu\text{m}/300\text{mm}$

$$\delta L_{3\alpha} = h_1 \tan \alpha = \pm 0.1\mu\text{m}$$

$$\delta L_{3\beta} = h_2 \tan \beta = \pm 0.095\mu\text{m}$$

测温仪系统精度为:  $\Delta T = \pm 0.2^\circ\text{C}, \Delta t = \pm 0.2^\circ\text{C}$

则:  $\delta L_2 = \pm 0.69\mu\text{m}$

经过误差修正后检测仪的未定系统误差为:

$$\delta L_2 = \sqrt{\delta L_1^2 + \delta L_2^2 + \delta L_{3\alpha}^2 + \delta L_{3\beta}^2 + \delta L_4^2 + \delta L_5^2} = \pm 1.1\mu\text{m}$$

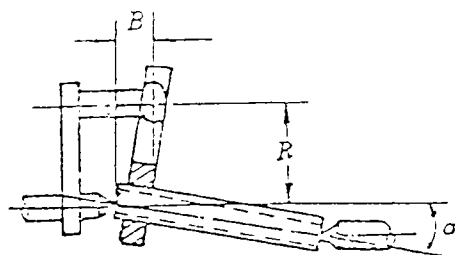


图 4 两顶尖偏置引起的转角误差

Fig. 4 The angle errors which having center offset

## 5 测试结果分析

螺距导程误差动态检测结果可用作导程误差的回归分析和频谱分析,将误差由时域转换到频域,在频率域中分析导程误差包含那些频率分量及分量大小据此找出误差源,为机床调整及工艺分析提供资料,进而提高零件加工精度。图 5 是校正阿贝误差前后的丝杆导程误差曲线,从曲线①中可看出误差曲线有一线性变化趋势和明显的周期分量,除丝杆本身的渐进累积误差外,线性变化与阿贝误差等因素有关,修正阿贝误差后的曲线②所示,误差周期变化与螺距( $T=14\text{mm}$ )严格对应,若周期误差从头到尾均匀分布,又以工件一转为周期时,这是由于机床头架主轴窜动所致,调整头架可减小误差。当周期误差从头到尾逐渐增加时,这应考虑尾

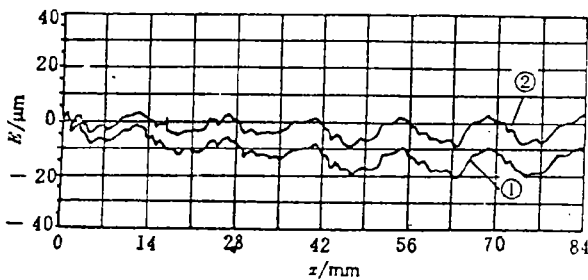


图 5 校正阿贝误差前后的丝杆导程误差曲线

Fig. 5 The contrasting curve of corrected Abb errors

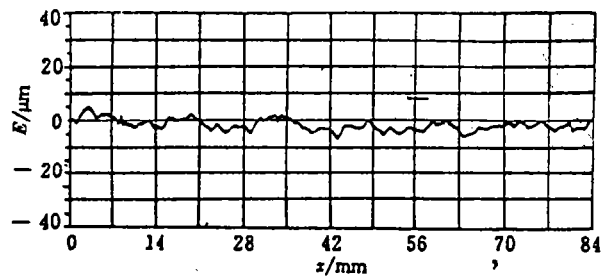


图 6 误差正后的丝杆导程误差实测值

Fig. 6 The curve of corrected lead errors

尖是否被破坏,修磨顶尖即可改善。如果周期误差是多次谐波叠加,这是主轴系统及挂轮误差所致,调整主轴系统与挂轮能有效减少此误差。图 6 是采用误差校正后的丝杆导程误差曲线图,从图中可见系统误差得到有效的抑制。图 7 是  $T=12\text{mm}$  的丝杆进行多次重复测量的误差曲线,从图可知该检测仪具有较好的重复测量精度。采用误差修正技术,仪器达到较高精度,同激光丝杆检测仪对比其误差值为  $\pm 1$  微米,且成本低,适用于车间现场测量。此检测仪已用于汽车方向机滚珠丝杆导程误差检测,获得较理想的测量结果。

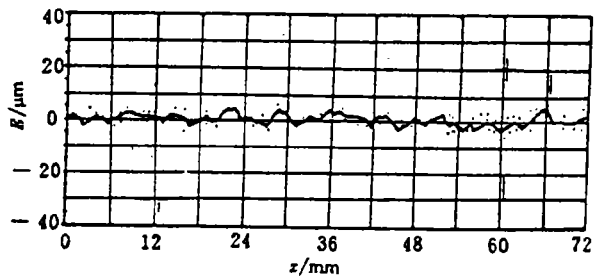


图 7 多次重复测量的丝杆导程误差曲线

Fig. 7 The curve of lead repeatability

## 6 结 论

在滚珠丝杆导程误差动态检测仪的研究中,用高精度检测仪测出影响仪器精度的主要误差源,研究其传递规律,利用系统误差修正方法,在动态检测过程中进行误差数据分析与补偿处理,从而提高仪器自身的精度,是一种切实有效、经济可行的方法。长光栅和圆光栅传感器性

能稳定、技术成熟,适于计算机数据处理和动态测量,长光栅和圆光栅传感的组合还可对凸轮升程、内孔直径等尺寸的动态测量。

#### 参 考 文 献

- [1]肖明耀,误差理论与应用.北京:北京计量出版社,1985  
[2]王玉璞,滚珠丝杆副导程误差的回归分析与频谱分析.计量技术,1987,(2):4—6  
[3]黄祖尧,国外滚珠丝杆副的精度、性能检测动向.机床,1985,[11]:37—39

### Study on Dynamic Measuring Instrument for Checking Lead Errors of Ball Screws And the System Errors Correction

Xiao Shali, Chen Ji, Yang Shixiong and Yu Hong  
(*Optoelectronic Machinery Department Chongqing University,  
Chongqing 630044*)

#### Abstract

It is important that the errors correction technique is adopted in the precision engineering for high measuring accuracy. An instrument which is controlled by computer to measure lead errors of ball screws is presented. The principle of the instrument and the system structure and the computer interface and the analysis of the instrument error are studied.

**Key words:** Errors correction, Dynamic measurement, Lead error

**肖沙里** 男,1953年生,硕士,重庆大学光电精密仪器系,工程师,长期从事测试与控制、微型机械设计、光栅传感器以及大量程纳米级定位精度的研究工作。