

## 加工中心双驱滚珠丝杠副动态性能试验平台设计\*

□ 刘永平<sup>1,2</sup> □ 白茹<sup>2</sup>

1.兰州理工大学 数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室 兰州 730050

2.兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

**摘要:**为了研究加工中心双驱滚珠丝杠副在高速运行状态下的性能状态,根据双驱滚珠丝杠进给系统的主要检测指标要求,计算确定了机械系统的方案,建立了 Pro/E 三维机械模型,进而设计了一种用于检测双驱滚珠丝杠副的动态性能试验平台。该试验平台上安装传感器,可以对双驱滚珠丝杠副的同步性、加速度、速度、热位移等动态性能参数进行测试,为进一步研究双驱滚珠丝杠性能提供可靠的实验数据。

**关键词** 加工中心 双驱 滚珠丝杠副 动态性能 试验平台

中图分类号:TH132

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2014)01-0057-04

**Abstract:** In order to examine the performance and behavior of dual-drive ball-screw pairs in machining centers at high speed running status, the Pro / E 3-D mechanical model is established by determine the mechanical system scheme through design calculations against the major detection indices of dual-drive ball-screw feed system ;a test platform for detection of dynamic properties of dual-drive ball-screw pair is designed ,The sensors installed on the test platform can test the dynamic properties of the dual-drive ball-screw pairs including synchronization, acceleration, velocity and thermal displacement etc. while providing reliable experimental data for reference during further study of the performances of dual-drive ball-screw.

**Key Words:** Machining Center Dual-drive Ball-screw Pairs Dynamic Properties Test Platform

随着数控机床向高速度、高精度、复合化、智能化方向发展,采用双驱滚珠丝杠同步驱动一个数控机床轴的控制方式,已广泛应用于高档数控机床和加工中心。双滚珠丝杠驱动不仅能提供更大的推力,因其结构上两边对称,故具有良好的稳定性,还能抑制因高速进给时所产生的振动<sup>[1]</sup>。然而由于两个滚珠丝杠所承载荷和外部扰动不同,使两边受力不对称,两滚珠丝杠无法保持理想的同步驱动,所产生的惯性力会影响系统性能<sup>[2,3]</sup>;并且随着数控机床的转速加快,引起机床噪声增大、滚珠丝杠副温度升高、定位精度急剧下降等问题。为了更好地了解双驱滚珠丝杠副在不同使用条件下的性能情况,通过搭建试验平台,对系统进行动态性能检测,分析影响系统性能的主要原因,从而针对相关问题,提出解决方法。

## 1 试验平台总体方案

根据检测试验条件的指标要求和系统总体结构组成要求及整体系统检测需要,整个双驱滚珠丝杠动态性能检测系统可分为机械系统和测试系统两大部分。机械系统通过计算和选型,确定滚珠丝杠副、轴承、相应的附件以及伺服电机的型号。测试系统采用 LMS Test. Lab 试验测试数据采集系统,并与计算机连接,通

\* 国家重大科技专项(编号:2010ZX04001-032)

收稿日期:2013年7月

过信号采集卡的通道与各个传感器相连,进行数字信号处理,最终在计算机中实时显示来分析其动态特性。

## 2 机械系统设计

### 2.1 设计参数

对系统的零部件进行计算和选型,双滚珠丝杠伺服驱动系统由床身、两套伺服电机、两套滚珠丝杠副、滚珠丝杠上的滑块、滚动导轨、对双轴进行耦合的工作台和相应的支撑附件和密封附件等组成,床身采用灰铸铁浇注而成。确定检测系统的总体设计参数,表1为双驱滚珠丝杠进给系统关键参数。

### 2.2 关键零件参数的计算及选型

#### 2.2.1 滚珠丝杠副的校核

参照 NSK 滚珠丝杠的样本,在双驱滚珠丝杠移动误差允许值的范围内,选取精度等级为 C3,可计算出

表1 双驱滚珠丝杠进给系统关键参数

参数名称	参数值
工作台质量 $m_2/kg$	2 000
工件质量 $m_1/kg$	2 000
滚珠丝杠最大有效行程/mm	1 000
最大进给速度/ $(m \cdot min^{-1})$	60
定位精度/mm	0.01
重复定位精度/mm	0.005
加速度/ $(m \cdot s^{-2})$	10

导程  $I$ :

$$I = \frac{V_{\max}}{N_{\max}} = \frac{60\,000}{3\,600} = 16.7 \text{ mm}$$

其中:  $N_{\max}$  为交流电机的最高转速, r/min;  $V_{\max}$  为工作台的最高传送速度, mm/min。

根据导程选取的要求, 设定导程为 20 mm。根据本测试系统的要求, 选用空心滚珠丝杠, 进而确定滚珠丝杠型号为 H40-12, 确定螺母型号为 EM40-20-6E。

(1) 滚珠丝杠系统刚度的校核。由于双驱滚珠丝杠副系统的两轴同步性较难控制, 为了最大限度降低滚珠丝杠的轴向位移偏差, 以及检测系统由于温差而造成的滚珠丝杠轴向微小位移误差, 需要更好地控制双驱滚珠丝杠副的同步性, 因此, 滚珠丝杠的支撑方式选用固定-固定式, 并在产生最大轴向位移的丝杠轴中央位置进行计算<sup>[4]</sup>。

丝杠轴的刚度  $K_s$ :

$$K_s = \frac{\pi d_r^3 E}{L_a} = \frac{3.14 \times 34.4^3 \times 2.06 \times 10^5}{1\,300} = 588\,800 \text{ N/mm}$$

其中:  $E$  是纵向弹性模量, MPa;  $L_a$  为丝杠的安装间距, mm;  $d_r$  为丝杠轴底槽直径, mm。

热位移量  $\Delta L_\theta$ :

$$\Delta L_\theta = \rho \theta L_a = 12.0 \times 10^{-6} \times 3 \times 1\,300 = 0.047 \text{ mm}$$

其中:  $\rho$  为热膨胀系数;  $\theta$  为丝杠轴平均温度上升值。

预张力  $F_0$ :

$$F_0 = \Delta L_\theta K_s = 0.047 \times 588\,800 = 27\,673.6 \text{ N}$$

丝杠轴的弹性位移量  $\Delta L_s$ :

$$\Delta L_s = \frac{F_0 L_a}{\pi d_r^3 E} \times 10^3 \mu\text{m} \quad (1)$$

式中: 滑动阻力  $F_a = \mu(m_1 + m_2)g = 5\,880 \text{ N}$ , 其中  $\mu = 0.15$  为滑动面的摩擦因数;  $g$  为重力加速度。

设定最大轴向负载的 1/3 作为预压负载  $F_{a0}$ :

$$F_{a0} = \frac{F_{\max}}{3} = \frac{(m_1 + m_2)g}{3} = 13\,067 \text{ N}$$

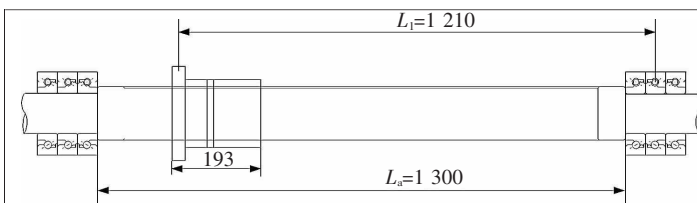
螺母的刚度  $K_n$ :

$$K_n = 0.8K \left( \frac{F_{a0}}{\varepsilon C_a} \right)^{\frac{1}{3}} = 1\,340 \text{ N}/\mu\text{m}$$

其中:  $\varepsilon = 0.1$  为刚性计算基准系数;  $K = 1\,340 \text{ N}/\mu\text{m}$  为刚性理论值;  $C_a = 66\,900 \text{ N}$  为额定动载荷。

螺母的弹性位移量  $\Delta L_N$ :

$$\Delta L_N = \frac{F_a}{K_n} = \frac{5\,880}{1\,340} = 4.39 \mu\text{m}$$



▲图1 压曲负载分析

滚珠丝杠轴的惯性矩  $J_B$ :

$$J_B = \frac{\pi \gamma d^4 L}{32} = \frac{3.14 \times 7.82 \times 10^{-3} \times 4^4 \times 150}{32} = 29.47 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

其中:  $\gamma$  为材料的密度,  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $d$  为丝杠轴的外径, cm;  $L$  为丝杠轴的长度, cm。

(2) 允许轴向负载。根据滚珠丝杠的安装方法和型号来确定参数, 其中丝杠轴底槽直径为  $d_r = 34.4 \text{ mm}$ , 由于轴承支撑方式为固定-固定式, 其中压曲负载系数  $\delta = 19.9$ , 根据螺母型号, 确定压缩负载  $P = 10\,354 \text{ N}$ ,  $L_1 = 1\,210 \text{ mm}$ , 进行压曲负载分析, 如图 1 所示。

无压曲发生的丝杠轴底槽直径  $d_r$  为:

$$d_r \geq \left( \frac{PL_1^2}{\delta} \times 10^{-4} \right)^{1/4} = 16.6 \text{ mm}$$

经计算, 满足设计要求。

(3) 允许转速的确认。滚珠丝杠选用管循环式的循环方式, 危险速度  $n = f \frac{d_r}{L_1^2} \times 10^7 = 21.9 \frac{34.4}{1\,210^2} \times 10^7 = 5145.55 \text{ r/min}$ , 得到最高转速  $N_{\max}$  小于危险速度; 许可  $dn_1 \leq 70\,000 \text{ mm}/\text{min}$ , 即:  $dn_1 = 40 \times 1\,500 = 60\,000 \text{ mm}/\text{min} \leq 70\,000 \text{ mm}/\text{min}$ , 满足条件。其中:  $f$  为危险速度系数;  $n_1$  为丝杠的平均转速, r/min。

丝杠额定疲劳寿命  $L_1$ :

$$L_1 = \left( \frac{C_a}{F_w F_{a0}} \right)^3 \times 10^6 = \left( \frac{66\,900}{1.2 \times 13\,067} \right)^3 \times 10^6 = 78 \times 10^6 \text{ rev}$$

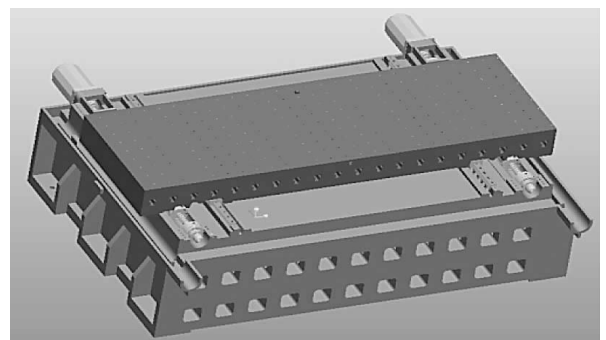
其中:  $F_w = 1.2$  为负载荷系数。经计算, 丝杠额定疲劳寿命满足产业机械疲劳寿命  $10^6 \text{ rev}$  的要求。

## 2.2.2 电机的选定

通过计算, 最终确定的滚珠丝杠驱动伺服电机选用 FANUC $\alpha$ i 系列  $\alpha 22/3000i$  交流伺服电机, 输出功率为 4 kW。

## 2.3 试验平台整体结构及三维模型

本试验平台为双驱滚珠丝杠运行试验平台, 试验平台在安装时, 严格保证两直线导轨和两滚珠丝杠在两方向的平行度。图 2 所示为运用 Pro/E 软件建立的试验平台机械系统三维模型。



▲图2 试验平台机械系统三维模型

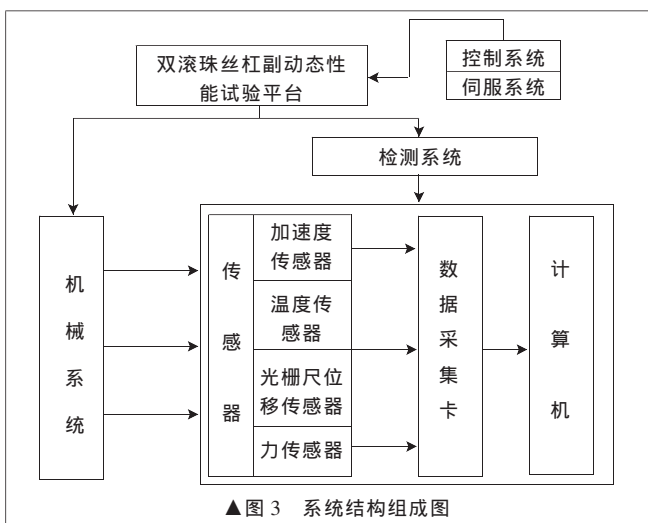
双驱动滚珠丝杠整个系统固定在基座上,两个伺服电机分别驱动两滚珠丝杠,两个滚珠丝杠伺服系统共同驱动中间的工作台,达到双轴同时驱动的目的。

### 3 检测系统设计

由于该系统属于轴类系统,安装上传感器和测试系统后,便可实现系统的相关动态性能参数的检测。

#### 3.1 检测系统总体方案

检测系统包括机械系统和数据采集系统。数据采集系统包括信号采集传感器、A/D 转换器、单片机、输入/输出接口电路和计算机<sup>[5]</sup>。图 3 为系统结构组成图。



▲图 3 系统结构组成图

#### 3.2 传感器的选型

在双驱滚珠丝杠同步控制的机床中,由于双驱滚珠丝杠系统的两个驱动轴的同步性很难控制,为了实时地观察双驱滚珠丝杠的动态性能指标,在试验台上安装了光栅尺、加速度传感器、接触式温度传感器、非接触式温度传感器等<sup>[6,7]</sup>。

(1)光栅尺位移传感器。它不仅可以对两丝杠轴的位置进行实时检测反馈和研究,而且还能反映出滚珠丝杠的热位移。为了检测双滚珠丝杠副两轴的位移情况,分别在两轴侧安装光栅尺位移传感器进行检测。此次采用的是 Renishaw 公司的高精度直线光栅尺,光栅尺位移传感器是由标尺光栅和光栅读数头两部分组成。将标尺光栅固定在丝杠螺母副上,随丝杠螺母副而动,光栅读数头固定在床身上。采用光栅尺作为丝杠螺母副的位移反馈,光栅尺反馈的位移加上电容测微仪反馈的位移即为系统的位移,然后对比和分析两光栅尺的测量情况,就可以反映出丝杠和工作台两侧位置偏差的变化。

(2)加速度传感器。它采用的是美国 PCB 公司三相加速度传感器,是一种体积小、质量轻的压电式传感器。由于要对双驱滚珠丝杠的双轴进行同步性测量,测

量加速度是非常必要的,它的固定方式有粘接、磁铁和螺栓等多种方式,在本测试试验中,将加速度传感器分别粘接在工作台和床身上。

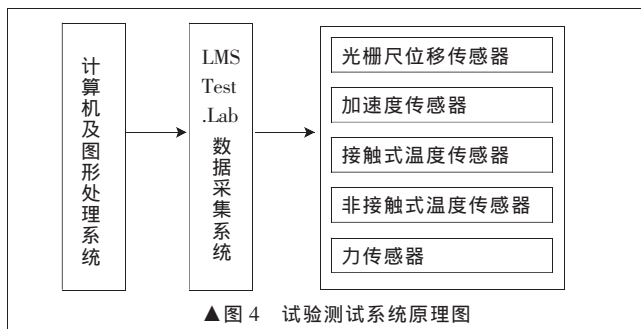
(3)接触式温度传感器。它安装在滚珠丝杠的进出口,用来测量两空心滚珠丝杠进出口冷却液的温度。

(4)非接触式温度传感器。在滚珠丝杠副的温度检测过程中,由于滚珠丝杠处于高速旋转的状态下,要对两丝杠进行检测,就必须选用非接触式温度传感器,本测试系统采用的是 IT-440 非接触式温度传感器,用来间接地测量两滚珠丝杠在运动过程中的热变形。

(5)力传感器。为了检测两滚珠丝杠在机床运行过程中床身和工作台的变形情况,本测试系统采用陶瓷压阻式压力传感器。

#### 3.3 数据处理方法

计算机中安装采集和数据处理软件,先利用高速数据采集板进行数据采集,并将采集的数据输入系统缓存中;在采集完成后,再将缓存中的数据逐一读取,通过各种接口和 A/D 采集卡,将传感器输出的信号输入到计算机上,然后用软件进行数据处理,并完成曲线的绘制。图 4 为实验测试系统原理图。



▲图 4 试验测试系统原理图

#### 3.4 测试系统搭建

4 个轴承座上分别安装接触式温度传感器,用来测量滚珠丝杠运行过程中轴承的摩擦发热情况,非接触式温度传感器用来测量滚珠丝杠的整体温升变化,床身和工作台上安装有三相加速度传感器,用来测量系统的加速度和振动情况,激光干涉仪用来测量滚珠丝杠副的定位精度和重复定位精度<sup>[8]</sup>。各个轴的一侧都装有光栅尺,是利用光栅的光学原理来检测两轴直线位移误差和热位移,进而检测双驱滚珠丝杠的同步性。图 5 为试验平台检测系统结构传感器布置图。

### 4 结束语

通过计算,设计了双驱滚动丝杠进给系统动态性能检测系统,该实验平台安装有传感器,为了更好地了解双驱动滚珠丝杠的特性,利用本实验平台,可对双驱滚珠丝杠在高速运转下的两滚珠丝杠副的同步性、加速度、速度、温升、定位精度等动态性能参数进行测试,

# 质量、质心、转动惯量一体化测试关键技术\*

□ 付轶轩 □ 姜万生 □ 秦现生 □ 谭小群

西北工业大学 机电学院 西安 710072

**摘要:**质量特性参数作为重要的物理参数,对物体的运动稳定性、可操作性、机动性和组合运动的一致性等有重要的影响。质量、质心、转动惯量参数对于弹体等在高速飞行时的姿态调整有着重要意义。介绍一种质量、质心、转动惯量一体化的测量方法和测试装置,并提出被测物沿给定轴的转动惯量的测量及计算方法。

**关键词:**质量 质心 转动惯量 测量方法 测试装置

中图分类号:V217\*.1

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2014)01-0060-04

舱体对导弹发射起着重要作用,在导弹发射过程中,包裹导弹的上下两舱体沿着回转轴张开角度的一致性,不仅影响导弹的发射,而且影响导弹的飞行轨迹。舱体的转动惯量是影响上下两舱体张开角度一致性的关键因素,因此,舱体转动惯量的测量是非常重要的。测量舱体沿着回转轴的转动惯量,需要舱体的质心位置等质量参数。

目前国内针对转动惯量的测量进行了比较多的研究,文献[1]综合分析了国内外几种质心的测试方法及其测试误差来源,文献[2]研究分析了几种转动惯量测

量的优缺点和对应测量的测量精度,但目前国内外对大型产品的质量、质心、转动惯量一体化测量设备的研究比较少。

本文将研究舱体的质量、质心的测量以及舱体沿给定任意转轴的转动惯量测量。根据舱体的结构特性,研究其沿着回转轴的转动惯量的测量方法,提出根据转动定律和平行移轴定理测量舱体沿着回转轴的转动惯量,基于此技术,完成测试系统的设计。

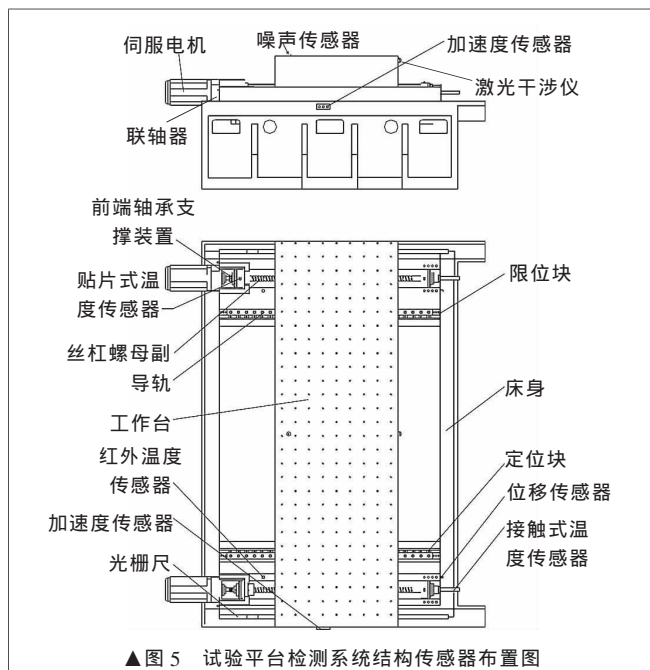
## 1 测量原理

### 1.1 质量、质心测量原理<sup>[3-5]</sup>

质量、质心测量方法主要采用机械重定位法、多点

\* 陕西省科技统筹创新工程计划项目(编号:2011KTCQ01-01)

收稿日期:2013年7月



▲图5 试验平台检测系统结构传感器布置图

并为双驱滚珠丝杠副产品的改进提供可靠的实验数据参考。由于研究有限,还有待进一步深入分析,希望通

过更进一步的实验研究,不断探索和改进双驱滚珠丝杠副的方法。

## 参考文献

- [1] 唐小琦. 数控机床双轴同步控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [2] 袁慧娟. 铣车复合加工中心双驱进给系统同步热误差分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2012.
- [3] 程颖. 基于PMAC的双丝杠驱动同步运动控制研究和应用[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [4] 李伟光,刘其洪,王元聪,等. 数控系统在机床双轴同步控制的应用[J]. 机电工程技术,2005,34(4):11-16.
- [5] 宋现春,刘剑,王兆坦,等. 高速滚珠丝杠副综合性能试验台的研制开发[J]. 工具技术,2005,39(3).
- [6] 肖正义,焦洁. 高速滚珠丝杠副的研发和测试技术[J]. 制造技术与机床,2004(4):95-98.
- [7] 刘永平,陈祯,芮执元,等. 高速空心滚珠丝杠副动态性能试验平台的研发[J]. 制造技术与机床,2012(10):78-81.
- [8] 罗辉. 同步双驱精密卧式加工中心优化设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

(编辑 小前)

