

温度致丝杠伺服系统直线度误差研究*

陈 诚 陈 瑞 周丹丹

(天津商业大学机械工程学院机械系 天津 300134)

摘要:滚珠丝杠副是精密伺服驱动系统核心零部件,随着丝杠运行,温度升高会导致丝杠单轴伺服系统直线度误差增加。为了明确该误差及其产生规律,建立滚珠丝杠副热误差模型,分别对滚珠丝杠副的热源、温度场以及热误差模型进行了研究。根据滚珠丝杠副的结构特点,确定其内部热源及温度场分布规律,分析热误差的特性。设计实验,检定温度变化前后的直线度误差,设定5 min间隔分段运行,明确温度和直线度误差的变化过程及规律。实验结果表明,随着温度升高,丝杠直线度误差随着丝杠本身的弯曲状态会出现更为明显的弯曲,剔除丝杠自身存在的直线度误差和检定过程中斜率误差后,直线度误差增加了11.4 μm 。本文得到丝杠直线度误差随温度变化的规律,可以应用于其他空间驱动系统整体几何误差的检定和补偿,具有较强的工程应用前景。

关键词:滚珠丝杠;热误差;直线度误差;误差检定

中图分类号: TH161.4 TN709 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Study on straightness error of screw servo system caused by temperature

Chen Cheng Chen Rui Zhou Dandan

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Ball screw is the core of precision servo drive system components, with the screw to run, the temperature will lead to increased single-axis screw servo system straightness error. In order to clarify the error and its generating rule, a thermal error model of the ball screw is established, and the heat source, temperature field and thermal error model of the ball screw pair are studied respectively. According to the structural characteristics of the ball screw, the distribution rules of the heat source and the temperature field are determined, and the characteristics of thermal error are analyzed. Design experiment, test the straightness error before and after the temperature change, pass 5 minutes interval to run, clear the temperature and straightness error of the process of change and the law. The experimental results show that, with the temperature rise, screw straightness error with the screw itself bending state will appear more obvious bending, remove the screw itself exists straightness error and calibration process slope error, straightness The error is increased by 11.4 μm . In this paper, the error of screw straightness with temperature is obtained, which can be applied to the verification and compensation of the overall geometric error of other space driving systems, which has a strong engineering application prospect.

Keywords: ball screw; thermal errors; straightness error; error detection

1 引言

滚珠丝杠副是精密伺服驱动系统的核心零部件,实现驱动及精密定位,针对伺服驱动系统的高速高精度发展,要求滚珠丝杠具有更高的精度^[1-3]。研究滚珠丝杠驱动系统热误差及其变形规律,是提高驱动系统精度、速度性能

的关键。

国内外众多学者针对滚珠丝杠驱动系统热误差,已经进行了大量研究。利用改进集总热容法,建立模型,分析滚珠丝杠副定位误差。针对丝杠支撑状态,分析得出丝杠、轴承温升与热变形是非线性相互耦合的变化。以及多变化热源作用下丝杠的复杂热特性^[4-6]。

收稿日期:2016-10

* 基金项目:天津市科技特派员项目(No. 15JCTPJC59900)、国家级大学生创新创业训练计划项目(201610069009)资助

以上方法多针对热变形产生的丝杠定位误差,并利用不同理论和丝杠热误差经验模型预测温度敏感点和丝杠轴向热变形的关系。而对于丝杠在热膨胀之后产生的直线度误差并没有太多的关注。在某些二维和三维驱动系统中,X、Y、Z轴驱动系统是通过单轴驱动装置的相互连接来实现二维和三维运动的。因此支撑其他轴驱动系统的直线度误差会传递到被支撑轴,耦合成其成轴轴向的定位误差。本文以丝杠温度场模型为基础,结合非线性热膨胀特性,研究双端支撑丝杠在温度变化后,变形引起的直线度误差变化规律。

2 滚珠丝杠副温度场及热变形模型

滚珠丝杠副产生热变形的重要热源是丝杠与螺母间的摩擦发热以及两端支撑轴承摩擦发热,如图1所示。

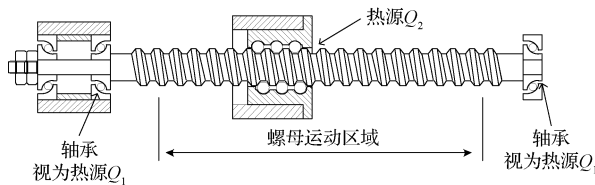


图1 滚珠丝杠副的主要热源

根据本文所用滚珠丝杠副的结构特点,将其传热特性简化为长度为 L 的一维杆传热模型。由图1可知,移动螺母处的摩擦热源可以简化为一个往复运动的移动点热源,而支撑轴承的摩擦热源简化为一个固定热源。

如图1所示,丝杠轴向长度 l 远大于其直径 $2R_0$,为了便于研究,忽略径向温差,视其为只存在轴向温度梯度的一维导热体,丝杠热传导方程为^[7-8]:

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{2h}{kR_0} T(x,t) - \frac{l}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: $T(x,t)$ 为 t 时刻丝杠上距热源为 x 的位置点的温度变化, α 为导热系数, k 为热导率, h 为丝杠与空气换热系数。

丝杠的温度响应由多个热源作用产生。由于热传导方程式(1)忽略了辐射以及传热时存在的非线性因素,式(1)是线性偏微分方程,满足叠加原理^[8]。即多个热源同时作用下,丝杠的温度响应等效于各个单热源作用下丝杠的温度响应的线性叠加,如式(2)所示:

$$T_{\text{总}}(x,t) = \sum T_i(x,t) \quad (2)$$

式中: $T_i(x,t)$ 为丝杠上第 i 个热源引起的温度响应。

丝杠螺母系统如图2所示,可认为该系统自身包含3个热源。1)轴承和电机可看成是热源 Q_1 ,丝杠温度响应为 $T_1(x,t)$ 。2)螺母移动发热视为热源 Q_2 ,实验设定,螺母在丝杠某确定范围内往返规律运动,故 Q_2 可以看成固定热源,温度响应为 $T_2(x,t)$ 。3)远端支撑螺母热源 Q_3 ,丝杠温度响应为 $T_3(x,t)$ 。得到丝杠温度分布模型,如式(3)所示:

$$T(x,t) = T_1(x,t) + T_2(x,t) + T_3(x,t) \quad (3)$$

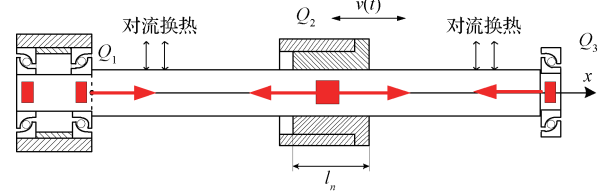


图2 滚珠丝杠副的一维杆传热模型

对单个热源建模,再进行叠加。

对式(3)的丝杠温度分布函数积分,求得滚珠丝杠副对应的热变形:

$$\delta(t) = \int_0^L \alpha_E T(x,t) dx \approx \alpha_E \cdot [\Delta L_0 T(x_0,t) + \Delta L_1 T(x_1,t) + \Delta L_2 T(x_2,t) + \dots + \Delta L_i T(x_i,t) + \dots + \Delta L_n T(x_n,t)] \quad (4)$$

式中: ΔL_i 是丝杠各分段长度, α_E 是丝杠的材料膨胀系数,将式(3)代入式(4),求得滚珠丝杠副热变形的表达式:

$$\delta(t) = \alpha_E \cdot [\Delta L_0 \alpha \cdot T(\gamma_0, \beta t) + \Delta L_1 \alpha \eta_1 \cdot T(\gamma_0, \beta t - \tau_1) + \Delta L_2 \alpha \eta_2 \cdot T(\gamma_0, \beta t - \tau_2) + \dots + \Delta L_i \alpha \eta_i \cdot T(\gamma_0, \beta t - \tau_i) + \dots] \quad (5)$$

当滚珠丝杠工作摩擦生热,发生热膨胀,且丝杠两端轴承为预紧双端支撑形式,丝杠热膨胀之后会发生弯曲形变,通过搭建激光干涉仪实验系统,可以测量丝杠在热变形后的直线度误差,进一步研究该弯曲形变的规律。

3 丝杠驱动系统直线度误差检定实验

设计实验,对丝杠温升之前及热变形后直线度误差进行检定,利用 Renishaw XL-80 激光干涉仪直线度误差组件检测。温度传感器采用 PT100 铂电阻,温度采集精度 0.1°C ,数据采集,选用 NI 信号采集卡。精密丝杠驱动实验室直线度检测,如图3所示。实验过程中螺母在丝杠上来回往复运动,丝杠总长度为 320 mm ,运行区间为 300 mm ,螺母运行速度为 60 mm/s 。在 X 轴运动方向上存在 Y 、 Z 两个方向的直线度误差。分别搭建直线度镜组,检定 X 轴在 Y 、 Z 两个方向的直线度误差。利用温度传感器采集丝杠温度数据,从丝杠靠近电机端运行起点开始测量,每隔 60 mm 取测量点。共得到丝杠6个位置的表面温度。运行前初始状态采集原始温度,运行起始后,每隔 5 min 采集一次实验数据。包括各点温度值和驱动平台在 Y 、 Z 方向的直线度误差。

丝杠表面温度变化如图4所示,当丝杠运行到 20 min 之后,在环境温度和运行条件不变的前提下,丝杠表面和外界热交换达到平衡,丝杠温度趋于稳定。

搭建激光干涉仪光路系统测量 X 轴在 Y 方向的直线度误差。实验初始采集丝杠6点温度值,并采集在初始温度时丝杠的初始直线度误差,利用激光干涉仪软件剔除驱动系统和激光光路的斜率误差,只保留驱动系统两端对零

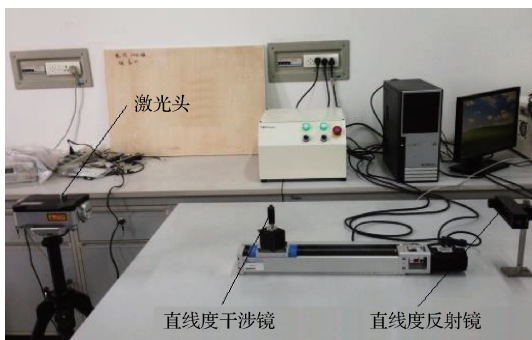


图3 精密丝杠驱动实验台直线度检测

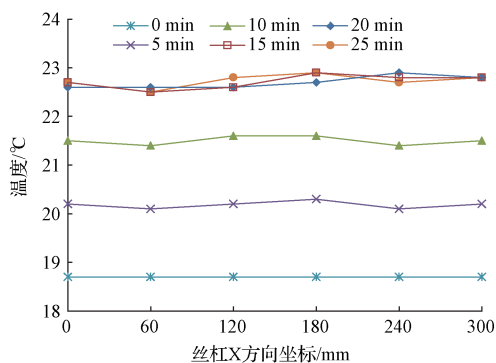


图4 丝杠温度变化

后再运行区间的直线度误差。起始状态Y方向直线度结果如图5所示,0 min曲线显示,最大值为 $2.2\ \mu\text{m}$,由于丝杠本身制造和装配存在直线度误差。

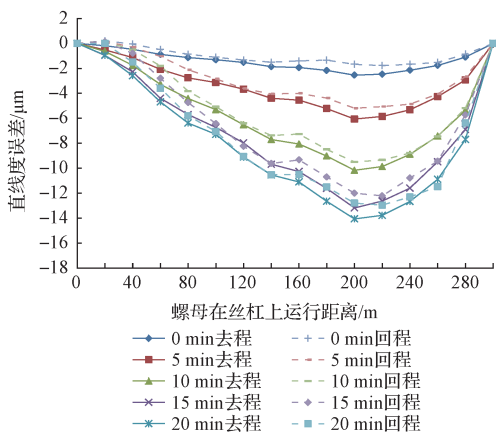


图5 丝杠Y方向直线度误差

驱动系统开始运行,实验过程中螺母在丝杠上来回往复运动,丝杠总长度为 $320\ \text{mm}$,螺母往复运行区间为 $300\ \text{mm}$,给定螺母运行速度为 $60\ \text{mm/s}$ 。

程序设定,螺母连续运行 $5\ \text{min}$ 后停止,在停止前采集最后一个往复来回的直线度误差,停止后,迅速采集丝

杠上6个分布点的温度。之后立刻运行下一个 $5\ \text{min}$ 的往复运动周期。重复进行上述实验,直到 $20\ \text{min}$,丝杠温度达到和外界环境的温度平衡。丝杠的形变也达到稳定状态。丝杠的直线度误差变化如图5所示。

丝杠温度变化和形状变化集中在前 $15\ \text{min}$,且形变和温度变化的趋势呈现合理的一致性,随着温度的增高,丝杠会出现膨胀,当温度趋于稳定,丝杠的形变也随之稳定。

如图6所示,丝杠在起始阶段和运行温升形变后的直线度误差。在两端轴承的作用力下,丝杠在原来弯曲的趋势下,呈现更为明显的扭曲,体现在直线度误差的明显变化。

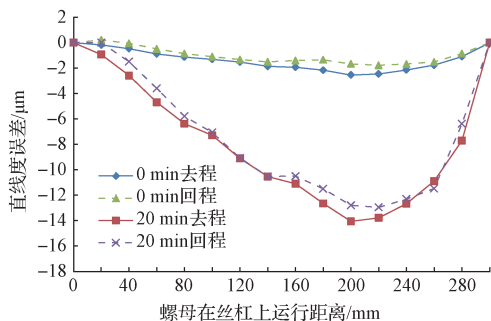


图6 丝杠Y方向起始及温升后直线度误差

为了更加明确直线度误差的变化,将起始阶段和 $20\ \text{min}$ 后,丝杠单程来回行程的直线度误差平均,如图7所示。对该两项平均误差做差,得到丝杠整体直线度误差的相对变化。为丝杠在温度变化后,纯粹由温度变化引起的直线度误差。可以看到,温度变化对丝杠形变会带来影响,当丝杠两端存在支撑轴承,丝杠不能自由伸长的时候,会产生膨胀后的弯曲,引起直线度误差的变化,本实验结果验证该实验条件下,丝杠有温度升高带来 $11\ \mu\text{m}$ 的直线度误差。

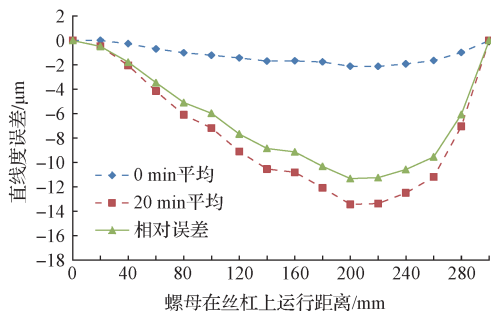


图7 丝杠Y方向直线度误差平均值及相对变化

单轴伺服驱动系统存在两个方向的直线度误差,调整激光干涉仪镜组的方向,重复上述实验,来检定该驱动系统在Z方向上的直线度误差,包括初始直线度误差和随温度变化后的直线度误差。实验结果如图8所示。可以看出丝杠在Z方向的直线度误差变化不明显。

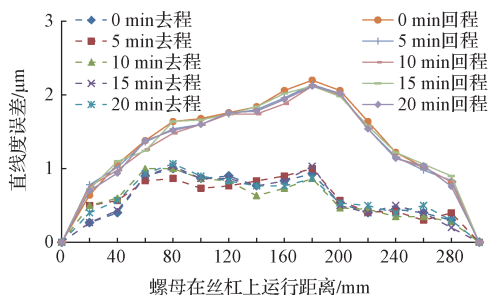


图8 丝杠Z方向直线性误差

4 结论

滚珠丝杠驱动系统在运行过程中,螺母轴承等环节存在摩擦生热,丝杠发生热膨胀,在丝杠两端轴承固定支撑的前提下,热伸长的丝杠会在本身存在直线性误差的基础上发生更为明显的扭曲,体现在直线性误差的变化上。

本文实验系统为单轴伺服驱动系统,利用激光干涉仪搭建误差实验系统,检定该单轴驱动系统在运行过程中垂直运行轴向两个方向的直线性误差。首先检定丝杠在初始没有温升的条件下,本身存在的固有直线性误差。通过消除斜率计算,得到实验用丝杠本身存在 $2.2 \mu\text{m}$ 的直线性误差。丝杠运行后,间隔 5 min 采集丝杠温度变化及丝杠的直线性误差。随着温度升到,丝杠直线性误差随着丝杠本身的弯曲状态会出现更为明显的弯曲,最大直线性误差达到 $13.7 \mu\text{m}$ 。可以看出,随着温度的变化,直线性误差增加了 $11.4 \mu\text{m}$ 。本实验检定的单轴直线性误差会耦合到二维和三维驱动结构的整体误差中,而本文得到丝杠直线性误差随温度变化的规律,可以应用于其他空间驱动系统整体几何误差的检定和补偿,具有较好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 杨军,施虎,梅雪松,等. 双驱伺服进给系统热误差的试验测量与预测模型构建 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11):53-59.
- [2] 邓丽,黄炎,费敏锐,等. 改进的广义预测控制及其在温度系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1057-1064.
- [3] 李艳,李英浩,高峰,等. 基于互信息法和改进模糊聚类的温度测点优化[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2466-2472.

- [4] ZHANG H, YANG J, ZHANG Y, et al. Measurement and compensation for volumetric positioning errors of CNC machine tools considering thermal effect[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(1-4):275-283.
- [5] HOREJS O. Thermo-mechanical model of ball screw with non-steady heat sources [C]. Thermal Issues in Emerging Technologies, 2007:133-137.
- [6] 夏军勇,胡友民,吴波,等. 热弹性效应分析与机床进给系统热动态特性建模 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 191-198.
- [7] 范金梅,徐黎明,赵晓明,等. 机床热误差补偿中温度传感器布置策略的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增刊1): 83-84.
- [8] 陈诚,杨传民,张晨阳. 考虑运行条件的 Elman 网络丝杠驱动系统热误差建模 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 704-711.
- [9] HAN J, WANG L, CHENG N, et al. Thermal error modeling of machine tool based on fuzzy c-means cluster analysis and minimal-resource allocating networks[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 60(5-8):463-472.
- [10] 夏军勇,吴波,胡友民,等. 多变化热源下的滚珠丝杠热动态特性 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 955-958.
- [11] 岑旭东,宋成桥,朱蕴璞,等. 多功能分析仪温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 80-84.
- [12] 王帅,阴玉梅,杨晓霞,等. 直流电机力促动器的控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1):48-55.
- [13] 王维,杨建国,姚晓栋,等. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7):165-170.

作者简介

陈诚,1980年出生,2004年、2007年、2010年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为天津商业大学副教授。主要研究方向为精密测试计量技术及仪器等。
E-mail: chen Cheng@tjcu.edu.cn