

文章编号 1004-924X(2015)02-0430-08

应用潜变量回归在线补偿双直接进给轴热误差

林献坤*, 王益涵, 朱琳

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高直线电机驱动的双直接进给轴的运动精度, 对该类进给轴的热误差进行了建模并研究了误差补偿方法。分析了双直接进给轴进给过程中热误差产生的原因及其补偿的复杂性, 给出一种基于潜变量回归的双直接进给轴热误差在线补偿方法。该方法应用激光干涉仪测量进给轴的热变形量, 使用热电偶和红外测温仪测量进给轴关键点的温度变化; 通过时间匹配变形和温度数据得到统计样本并建立基于潜变量回归的热误差识别模型。以模型的在线计算确定误差补偿量, 给出了与数控系统兼容的补偿控制输出策略及补偿系统构建方案。在自构建的龙门双直线电机驱动进给轴平台上进行了在线补偿实验。结果表明: 应用潜变量回归方法对双直接进给轴进行热误差补偿可使双直接进给轴的热误差减小 75%。

关键词: 直线电机; 直接进给轴; 热误差; 潜变量回归; 在线补偿

中图分类号: TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0430

Online compensation of thermal error for dual direct feed drive system with latent variable model

LIN Xian-kun*, WANG Yi-han, ZHU Lin

(Mechanical Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: linxk333@126.com

Abstract: The thermal error from a dual direct feed axis driven by linear motors was analyzed and the error compensation method was proposed to improve the accuracy of the system movement. The causes of thermal error generation in the motion processes and the complexity of the compensation were discussed. And then a compensation method based on Latent Variable Regression(LVR) was applied to improvement of the positioning accuracy of the feeding axis. With the method, a laser interferometer was utilized to obtain the thermal deformation of the feed axis in real-time. Some thermocouples and infrared thermometers were used to measure the temperatures of some key points at the linear axis. A regression model based on latent variable model was established to recognize the thermal deformation behavior of the mechanism. The prediction magnitude for on-line error compensation was acquired through the real-time regression calculation and a corresponding system was developed with output control strategy for the compensation process. To demonstrate the procedure of the proposed

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51005158); 国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04008-011-02)

approach, an experiment was conducted on the self-construction gantry double direct feed axis test rig. the experimental results show that the method for thermal deformation error compensation reduces the linear feed axis thermally induced error by 75%.

Key words: linear motor; direct feed axis; thermal error; latent variable model; online compensation

1 引言

基于直线电机驱动的直接进给轴是一种不需要中间传动环节的进给驱动机构,与传统的滚珠丝杆进给轴相比,具有响应速度快、定位精度高、无行程限制、效率高等优点^[1-2]。当机床运动部件重量较大时,依靠单直线电机驱动进给机构,难以获得高的加速度。同步进给轴技术依靠双直线电机驱动,可以提供更大的推力,进而获得更高的加速度与更快的进给速度,已得到越来越多的关注^[3]。高加速度和高进给速度需要直线电机有足够大的电流,这容易导致电机的初级线圈发热增大,在没有冷却系统作用时,线圈温度可达 100 °C^[4]。在双直线电机驱动同步进给轴中,主动轴和从动轴驱动电机所受负载难以对称,主动轴与从动轴热变形不一致,同步进给轴的热误差具有复杂性,热误差的存在影响了双直接进给轴在机床中的应用^[5]。JONG J K 等^[5]应用有限元仿真和试验研究相结合的方法对 3 轴联动的直线电机驱动的机床整机热行为进行了研究;Eun I U^[6]对同步直线电机和异步直线电机的热行为做了比较;Chow J H 等^[7]应用单维热源的集热容模型,研究直线电机初级线圈的发热对滑台面温度分布影响和误差预测方法;林献坤^[8]等对直接进给轴的温度场分布和热变形特性进行了实验研究。

应用在线补偿方法可以降低进给轴误差,提高进给轴的进给精度^[9-10]。在机床热变形补偿研究中多采用实验和建模相结合的方法,如先用神经网络^[11]、支持向量机^[12]等方法进行建模而后进行补偿。神经网络和支持向量机可建立精度较高和鲁棒性较强的热误差模型,但这些建模方法本质上都是基于学习型的回归模型,而学习型回归模型存在建模所需学习时间长、模型较大的依赖学习样本、难以分析变量对模型的作用程度等不足。统计型的回归分析方法在机床热误差建模中也得到广泛关注,但统计变量和参数估计对模型具有重要影响。由于不同的温度变量与变形的回

归模型之间存在高度非线性,提高模型的鲁棒性还需开展较多研究^[13]。潜变量回归方法^[14](Latent Variable Model, LVM)是介于线性回归和学习之间的一种多变量对多变量的回归建模方法,集多元线性回归分析、主成分分析、典型相关分析的基本功能为一体,当自变量集合内部存在较程度的相关性时,它可以对自变量进行整合与筛选以剔除自变量间的多重相关性,从而最大程度提炼出自变量与因变量有关的信息并进行回归分析,在经济统计、化学及化工分析、生命科学等领域已得到较好的应用^[15]。

本文以自构建的双直线电机驱动进给轴为研究对象,建立热误差识别模型,为提高双直接进给轴的运动精度,给出一种在线补偿方法。以潜变量回归作为推理计算工具,探索热误差补偿量的输出控制策略,为促进双直接进给轴在高速、高精度数控机床的广泛应用起推动作用。

2 潜变量回归的建模方法

2.1 潜变量模型的基本原理

设有 p 个自变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$, q 个因变量 $\{y_1, y_2, \dots, y_q\}$, 为了研究因变量与自变量之间的关系,观察 n 个样本点,得到自变量与因变量数表 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_p]_{n \times p}$, $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_q]_{n \times q}$ 。因在实际问题中不同变量的单位不同,故首先对数据中心标准化处理,得到对应中心标准化变量 \mathbf{E}_0 和 \mathbf{F}_0 , 即 \mathbf{E}_0 和 \mathbf{F}_0 的均值为 0, 方差为 1。

LVM 的基本原理是从变量 \mathbf{E}_0 中提取主成分 t_1 , 提取这个主成分一方面要求 t_1 尽可能大地携带 \mathbf{E}_0 数据表中的变异信息, 即 t_1 的方差应尽可能的大, 另一方面要求 t_1 与 \mathbf{F}_0 的相关程度能达到最大。综合起来, 要求 t_1 与 \mathbf{F}_0 的协方差达到最大, 即:

$$\text{Cov}(t_1, \mathbf{F}_0) = \sqrt{\text{var}(t_1)} r(t_1, \mathbf{F}_0) \rightarrow \max, \quad (1)$$

式中: $t_1 = \mathbf{E}_0 \mathbf{w}_1$, \mathbf{w}_1 为单位向量, 即 $\|\mathbf{w}_1\| = 1$; $\text{Cov}(t_1, \mathbf{F}_0)$ 是 t_1 、 \mathbf{F}_0 的协方差; $\text{var}(t_1)$ 是 t_1 的方差; $r(t_1, \mathbf{F}_0)$ 为 t_1 和 \mathbf{F}_0 的相关系数。采用拉格朗

日算法得 w_1 为 $\mathbf{E}_0^T \mathbf{F}_0 \mathbf{F}_0^T \mathbf{E}_0$ 最大特征值对应的单位特征向量,即得到第一个主成分 t_1 。求得 \mathbf{E}_0 和 \mathbf{F}_0 对 t_1 的回归方程:

$$\mathbf{E}_0 = t_1 \mathbf{p}_1^T + \mathbf{E}_1, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_0 = t_1 \mathbf{r}_1^T + \mathbf{F}_1, \quad (3)$$

式中:回归系数向量:

$$\mathbf{p}_1 = \frac{\mathbf{E}_0^T t_1}{\|t_1\|^2}, \mathbf{r}_1 = \frac{\mathbf{F}_0^T t_1}{\|t_1\|^2}, \quad (4)$$

其中: $\mathbf{E}_1, \mathbf{F}_1$ 分别是对应回归方程的残差矩阵。以 $\mathbf{E}_1, \mathbf{F}_1$ 代替上述 $\mathbf{E}_0, \mathbf{F}_0$ 并重复步骤得到第二个主成分 t_2 及相应的残差矩阵 $\mathbf{E}_2, \mathbf{F}_2$ 。如此循环得到 m 个相互正交的主成分 t_1, t_2, \dots, t_m 。最后可实现 $\mathbf{E}_0, \mathbf{F}_0$ 在 t_1, t_2, \dots, t_m 上的回归,即:

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{T}\mathbf{P} + \mathbf{E}_m, \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{T}\mathbf{R} + \mathbf{F}_m, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_m)$, $\mathbf{P} = (\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_m)$, $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m)$ 。

由于 t_1, t_2, \dots, t_m 均是 $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0p}$ 的线性组合,故 \mathbf{F}_0 也可由 $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0p}$ 线性表示,得 \mathbf{F}_0 的回归表达式:

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{E}_0 \mathbf{B} + \mathbf{F}_m, \quad (7)$$

式中: \mathbf{B} 为 LVM 系数向量。

2.2 交叉有效性检查

通过潜变量模型的成分提取可以对变量进行整合,以剔除变量间的多重相关性,为了提高系统建模的准确性,需要进一步对主成分进行筛选,实现区分系统的信息和噪声。通过考察增加一个新的成分,对模型预测能力是否有明显的提高来判断该成分是否有效。具体方法如下:

首先去除某样本点 i ,用其余样本点并使用 h 个成分拟合一个回归方程,带入样本点 i ,计算拟合值 $\hat{f}_{h(-i)}$,预测误差平方和为 PRESS_h ,可表示为:

$$\text{PRESS}_h = \sum_{i=1}^n (f_i - \hat{f}_{h(-i)})^2. \quad (8)$$

采用所用样本点,拟合含有 h 个成分的回归方程,记第 i 个样本点的预测值为 \hat{f}_{hi} ,误差平方和为 SS_h ,可表示为:

$$\text{SS}_h = \sum_{i=1}^n (f_i - \hat{f}_{hi})^2. \quad (9)$$

通常情况下有 PRESS_h 大于 SS_h ,而 SS_h 则小于 SS_{h-1} 。其中 SS_{h-1} 表示包含全部样本点,使用 $(h-1)$ 个成分方程的拟合误差; PRESS_h 使用 h

个成分,但却含有样本点的扰动误差。如果 PRESS_h 在一定程度上小于 SS_h ,则认为增加一个成分 t_h 可以提高拟合方程的精度。交叉有效性可表示为:

$$Q_h^2 = 1 - \frac{\text{PERSS}_h}{\text{SS}_h}. \quad (10)$$

当 $Q_h^2 \geq 0.0975$ 时,则认为 t_h 成分对于回归识别的贡献是显著的,回归过程需要引入这个成分向量;反之,舍弃 t_h ,主成分提取完成。

2.3 统计样本的形成方法

潜变量回归方法是把高维样本空间信息投影到由几个潜变量组成的低维信息空间的多变量回归方法,潜变量中包含了原始数据中的重要信息,且潜变量间互相独立。为了保证潜变量模型的准确性和可靠性,避免模型的特殊性和单一性,采用从数据库中随机筛选数据的方法构建样本库。具体方法如下:

设置一个数据跨度 P^* ,表示从数据库中每组数据中挑选一个数据添加到样本库中,并且每次挑选是随机的。设数据库中共有 s 组数据, $\mathbf{W}^* = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_t]_{s \times t}$,其中每组数据有 t 个数据点,则构建的样本库 \mathbf{X} 中包含 $(s - P^*)$ 组数据,样本库中第 i 个样本为:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{W}_i^* - \mathbf{W}_{i+P_i}^*, \quad (11)$$

其中: P_i 为随机产生的不大于 P^* 的正整数。通过此方法得到随机样本库,可以保证使用该样本库的潜变量模型更具一般性和可靠性。

3 试验平台及其补偿模型

3.1 试验平台建立

建立了如图 1 所示的双直线电机驱动直接进给轴试验台,试验台为双直线电机驱动龙门移动式机构,示意了笛卡尔坐标系中相关坐标轴,包括 X_1 轴、 X_2 轴、 Y 轴和 Z 轴等,其中以 X_1 轴、 X_2 轴为同步控制进给轴。

进给机构中可产生热误差的因素包括直线电机中的电流会使初级线圈发热、导轨副之间的摩擦使导轨及滑块产生温升以及滑台机构和光栅尺的温度变化等。进给机构产生的热误差主要包括轴向热误差、径向热误差以及扭曲热误差,而对主轴运动精度影响最大的是轴向热误差,故以轴向热误差为研究对象。为了对轴向热误差模型建立

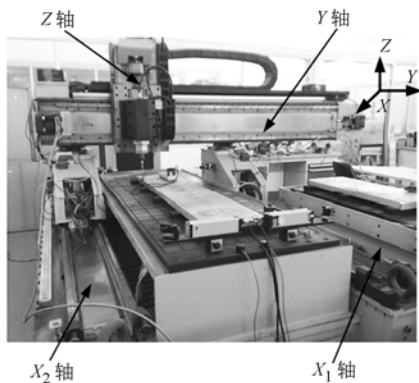


图 1 龙门双直线电机驱动进给轴实验台

Fig. 1 Test rig with gantry double direct feed axes

起统计数据样本,建立如图 2 所示温度测量系统。

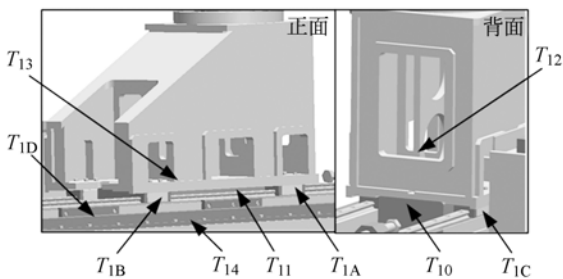


图 2 温度测量点布置图

Fig. 2 Temperature measurement point layout

系统中除一个环境温度测量点外,在双直接进给轴上各选取 9 个关键温度测量点。其中,环境温度为 T_0 , X_1 进给轴上的关键温度点分别为直线电机初级线圈温度 T_{10} 、光栅尺读数头温度 T_{11} 、进给滑台机构温度 T_{12} 和 T_{13} 、导轨表面温度 T_{14} 、4 个支撑滑块温度 T_{1A} 、 T_{1B} 、 T_{1C} 、 T_{1D} ; X_2 进给轴温度测量点与 X_1 进给轴温度测量点对称布置。测量导轨表面温度的位置随着进给轴运动不固定,采用 OPTRIS CTLT 红外温度传感器采集数据,该红外温度传感器为非接触测量。将此红外温度传感器固定于滑台上,随滑台运动实现对导轨不同位置的温度测量,其余各固定测量点使用 STT-RA 铂电阻温度传感器。

采用双通道双频激光干涉仪进行轴向热变形在线精密测量,2 个激光干涉仪发射器平行放置于导轨两侧,对应 2 个反射镜布置于滑台上并随滑台一起运动,激光通过该反射镜反射后,实现对双直接进给轴的轴向热误差测量。热误差测量系统运行时,各测量点都以毫秒时间精度记录各点数据,进给轴进给过程中,在不同进给位置上的温

度及热误差数据通过毫秒时间索引进行数据同步。

通过上述传感器布置,实时采集双直接进给轴上关键位置的温度传感器(自变量)和激光干涉仪(因变量)的数据,建立数据样本库,应用 LVM 方法回归计算,得到回归系数,建立热误差模型。获取回归系数后,依据式(7)计算得到不同温度情况下的热误差值。

3.2 补偿模型及补偿控制

为实现双直接进给轴热误差在线补偿,依据 LVM 方法建立热误差在线补偿系统,原理如图 3 所示。布置在进给轴上的温度传感器采集到的关键点温度数据,实时送入补偿计算机,补偿计算机依据热误差模型计算出进给轴的轴向热变形预测量。补偿决策函数根据轴向热变形量,给出补偿值,依据该补偿值,通过 Advantech PCI-1756 高速 I/O 卡向数控系统发出补偿码,实现在线补偿。

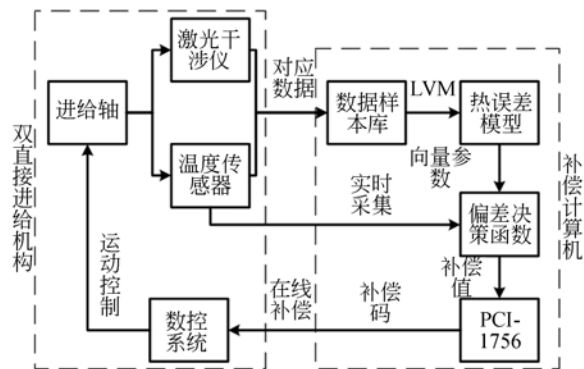


图 3 补偿模型示意图

Fig. 3 Block diagram for error compensation model

为了提高补偿精度和补偿效率,对读取的温度数据与进给轴起始温度做比较,用当前读取温度与起始温度的差值计算热变形量,并对热误差判断,只有当热误差大于 $1 \mu\text{m}$ 时才向数控系统发送补偿码进行热误差补偿。补偿决策函数根据热误差计算得出一个 16 位二进制数作为补偿码,补偿码的构建如图 4 所示。补偿码中高 8 位表示 X_1 轴的补偿码,低 8 位表示 X_2 轴的补偿码,各进给轴补偿码包含补偿值和补偿方向以及补偿开关量。各轴补偿码中最高位表示补偿方向,正方向用 1 表示,负方向用 0 表示;次高位表示补偿开关量,开启补偿用 1 表示,关闭补偿用 0 表示;其余表示补偿值。

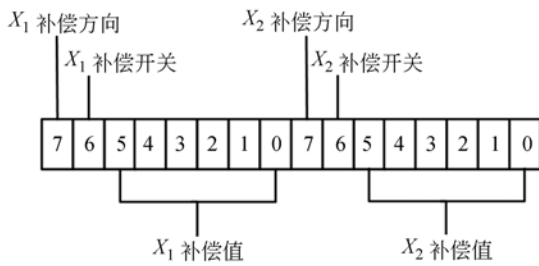


图 4 补偿码示意图

Fig. 4 Code construction for compensation control

4 实验研究及性能分析

4.1 实验方案设置

为验证热误差在线补偿方法,建立如图 5 所示的实验系统,系统由龙门双直线电机驱动进给轴实验台、数控系统、温度调节系统、在线补偿计算机、激光干涉仪、温度采集系统等组成。其中驱动电机为 SIEMENS 1FN3 直线电机,数控系统配备 SINUMERIK 840D 系统。实验中进给轴的进给速度采用 1 m/min,在进给过程选取 4 个坐标采样点来检验补偿效果,每个采样点间距 20 mm,采样坐标分别为 $X=20, 40, 60$ 和 80。实验前先测量上述 4 个位置的重复定位误差,实验结果表明该进给轴在上述 4 个位置的重复定位误差小于 $2 \mu\text{m}$ 。



图 5 实验系统

Fig. 5 Experiment system for research work

进给轴在热平衡下的变形补偿,只是统计中的一种具体样本,因此为了模拟加工过程中复杂温度变化下的补偿可行性和性能,使用温度调节系统来实现实验台的温度动态控制,使补偿实验样本更具多样性。实验过程持续 90 min,前 60 min 保持实验台温度上升,后 30 min 实验台温度持续下降。

4.2 结果及分析

经过上述实验获得数据样本,得到如图 6 所示双直接进给轴关键点温升图。从图中可见 X_1 进给轴和 X_2 进给轴温度变化趋势大体相同,在 90 min 内,直线电机初级线圈温度变化最大。从图中可见, X_1 轴直线电机初级线圈温度上升 13° , X_2 轴直线电机初级线圈温度上升达 15° ,在温度调节系统的作用下,直线电机初级线圈测量点 T_{10} 、 T_{20} 的温度可以降到初始温度,其余各温度测点由于热传递的延迟性,温度虽下降但没有降到初始状态。

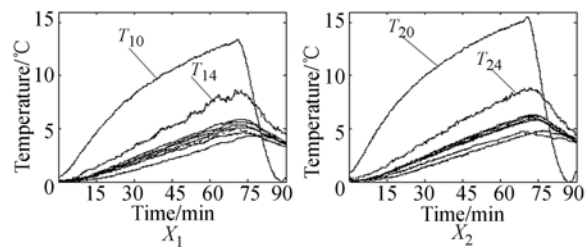


图 6 进给轴关键点温升情况

Fig. 6 Temperature variation of some key points

建立样本库后,采用这 19 个温度变量和 3 100 组统计样本,经过约 5 s 时间的向量更新计算,得到识别进给轴热行为的潜变量模型。利用该潜变量模型的回归计算,得到如图 7 关键点温度对轴向热误差影响系数棒图。对影响系数棒图比较分析,可以看出:双直接进给轴的热误差影响因素主要是直线电机初级线圈温度、光栅尺读头温度和环境温度;两进给轴的导轨影响系数相当,但正负相反,可知在高速精密进给轴的设计中需要考虑导轨温度散热的一致性;直线电机初级线圈的温度变化虽然最大,但其温度测点变量受到了筛选,说明该温度通过电机外壳传导到滑台,进而影响了进给轴热变形量,它的作用是间接的,改善直线电机与滑台之间的隔热对抑制双直接进给轴热误差是必要的。

为了检验应用 LVM 建立的热误差模型的精度,随机选取 250 组数据,代入 LVM 数学模型,获得预测热误差。预测热误差与实验所得热误差差值为预测偏差值,得到图 8 所示的模型预测效果图。纵坐标表示双直接进给轴实验观测热误差与 LVM 模型预测的偏差值,横坐标表示样本点序号,黑点表示应用 LVM 对热误差的预测效果,从黑点分布可见,预测偏差值都控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以

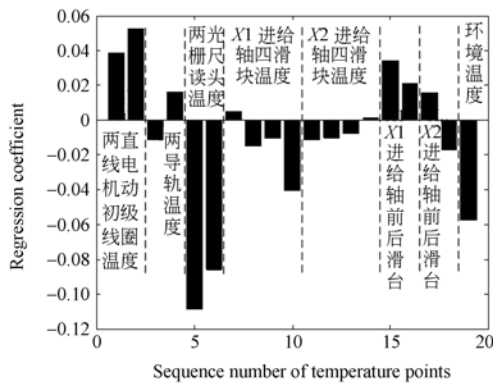


图 7 关键点温度对热误差影响程度

Fig. 7 Influence of temperature of key points

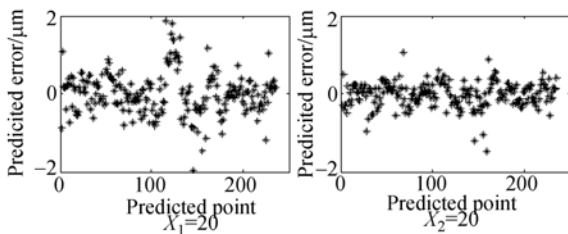


图 8 模型预测效果图

Fig. 8 Prediction performance of LVM model for $X = 20$ position

内,均值误差 $1 \mu\text{m}$ 之内,预测精度较高。图 8 为 $X=20$ 处两进给轴模型预测效果图,其余各位置预测效果如表 1 所示。可以看出,均值误差和标准差都比较小,最大偏差为 $3.767 \mu\text{m}$,说明建立的模型在不同的位置 and 不同温度分布下具有较好的热行为识别性能。可见,应用 LVM 可精确地建立热误差模型。

表 1 模型预测效果数据

Tab. 1 Performance of model prediction

进给轴位置	均值/ μm	最大偏差/ μm	标准差
$X_1=40$	-0.011	-1.499	0.477
$X_2=40$	-0.016	-1.032	0.318
$X_1=60$	0.046	3.767	1.15
$X_2=60$	0.017	1.378	0.33
$X_1=80$	0.018	-2.712	0.89
$X_2=80$	0.021	0.971	0.32

利用上述建立的轴向热误差模型,通过实时采集温度数据,应用式(7)进行回归计算,计算所需时间和一个补偿循环周期共耗时小于 2 ms ,表明潜变量回归的方法在补偿控制中具有良好性

能,通过计算所得的回归方程满足在线补偿要求。启动补偿系统后,以样本建立时的相同条件,进行试验并检测进给轴的热误差,得到如图 9 所示的补偿效果图。图中纵坐标为热误差,横坐标为采样时间。对比补偿前后可以看出,补偿前各检测位置处轴向热误差都在 $20 \mu\text{m}$ 以上,补偿后各位置处的轴向热误差都被控制在 $5 \mu\text{m}$ 以内,与补偿前轴向热误差值相比,双直接进给轴轴向热误差减小 75% 。综合上述的分析可见,本文提出的应用 LVM 的方法在线补偿双直接进给轴轴向热误差是可行的,能有效地减少双直接进给轴的轴向热误差。

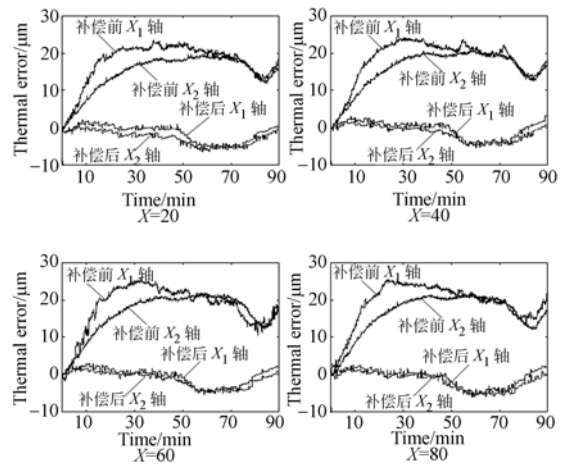


图 9 补偿效果图

Fig. 9 Compensation performance for some different positions

5 结 论

本文通过引入应用潜变量回归方法对双直线电机驱动的同步直接进给轴的轴向热变形进行在线补偿研究。首先针对双直接进给轴热误差的特点,研究应用统计数据和学习方法相融合的潜变量回归建模方法,建立了双直接进给轴的热误差识别模型;然后根据潜变量的建模方法,以激光干涉仪和温度传感器为支撑,建立了与数控系统兼容的在线补偿系统,给出了补偿控制输出策略与补偿系统构建方案,实现了依据回归计算得到的热变形误差补偿量,对进给轴进行在线补偿控制;最后在自构建实验系统上,进行了测试和补偿控制实验研究。结果表明:应用潜变量回归的方法在线补偿双直接进给轴的热误差是可行的,且补

偿系统具有良好性能,通过在线补偿可使双直接进给轴热误差减小 75%。本文工作为促进双直

接进给轴在高速、高精度数控机床的广泛应用提供了参考。

参考文献:

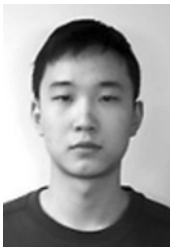
- [1] LIN CH J, YAU H T, TIAN Y CH. Identification and compensation of nonlinear friction characteristics and precision control for a linear motor stage [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transaction*, 2013,18(4):1385-1396.
- [2] SATO K, KATORI M, SHIMOKOHBE A. Ultra-high-acceleration moving-permanent-magnet linear synchronous motor with a long working range [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions*, 2013, 18(1):307-315.
- [3] HSIEH M F, TUNG CH J, YAO W S. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*,2007(47): 546-554.
- [4] JANG C, KIM J, KIM Y. Thermal resistance modeling of linear motor driven stages for chip moulder applications [J]. *IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies*, 2003, 26 (3): 532-540.
- [5] JONG J K, YOUNG H J, DONG W C. Thermal behavior of a machine tool equipped with linear motors [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(7-8):749-758.
- [6] EUN I U. Comparison between asynchronous and synchronous linear motors as to thermal behavior [J]. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2001, 2(3):61-68.
- [7] CHOW J H, ZHONG Z W, LIN W, *et al.*. Investigation of thermal effect in permanent magnet linear motor stage, in conference [C]. 2010 *IEEE 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore*, 2010:258-263.
- [8] 林献坤,李燕军,吴倩倩. 高速直线电动机驱动进给轴热行为测试研究[J]. *制造技术与机床*,2012,11: 25-29.
- LIN X K, LI Y J, WU Q Q. Test of thermal behavior of high speed feed drive system equipped with linear motor [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012, 11: 25-29. (in Chinese)
- [9] 苗恩铭,成天驹,牛鹏程,等. 数控机床热误差补偿高次多阶 ADL 模型应用分析[J]. *中国机械工程*, 2013,24(15):2088-2092.
- MAO E M, CHEN T J, NIU P CH, *et al.*. Application of high order and multi-level autoregressive distributed lag model to thermal error compensation of machine tools [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013,24(15):2088-2092. (in Chinese)
- [10] 林献坤,李燕军,袁博. 基于学习的 2x/y 直线进给轴圆轮廓误差精密补偿方法[J]. *机械工程学报*, 2011,47(19):168-173.
- LIN X K, LI Y J, YUAN B. Learning-based accurate compensation of 2x/y tow-dimensional circular contour error for linear feed axes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47 (19): 168-173. (in Chinese)
- [11] HUANG Y Q, ZHANG J, LI X. Thermal error modeling by integrating GA and BP algorithms for the high-speed spindle [J]. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2014,71: 1669-1675.
- [12] 林伟青,傅建中,许亚洲,等. 基于在线最小二乘支持向量机的数控机床热误差建模与补偿[J]. *计算机集成制造系统*,2008,14(2):295-299.
- LIN W Q, FU J ZH, XU Y ZH, *et al.*. Thermal error modeling & compensation of numerical control machine tools based on on-line least squares support vector machine [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14 (2): 295-299. (in Chinese)
- [13] 苗恩铭,龚亚运,牛鹏程,等. 自回归分布滞后模型在数控机床热误差建模中的应用[J]. *计量学报*, 2013,34(3):226-233.
- MIAO E M, GONG Y Y, NIU P CH, *et al.*. Application of autoregressive distributed lag model to thermal error compensation of machine tools [J]. *Acta Metrological Sinica*, 2013,34(3):226-233. (in Chinese)

- [14] WANG H, HUANG Q. In-Line statistical monitoring of machine tool thermal error through latent variable modeling [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(4):279-292.
- [15] 常英杰,陆宪忠,王世龙,等. 基于偏最小二乘回归的发动机排气分析仪线性化研究[J]. *机械工程学*

报,2011,47(10):76-81.

CHANG Y J, LU X ZH, WANG SH L, *et al.*. Study on the linearization of analyzer for engine exhaust based on partial least squares [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(10):76-81. (in Chinese)

作者简介:



王益涵(1989—),男,江苏连云港人,硕士研究生,2011年于南京理工大学机械工程学院获得学士学位,主要从事数控机床测试和补偿研究工作。E-mail: wyh0131@163.com



朱琳(1990—),女,黑龙江省齐齐哈尔人,硕士研究生,2012年于哈尔滨商业大学获得学士学位,主要从事测试控制、数控技术开发及应用。E-mail: 1035676237@qq.com

导师简介:



林献坤(1975—),男,福建仙游人,博士,副教授,1998年于江苏大学获得学士学位,2001年于江苏大学获得硕士学位,2007年于同济大学获得博士学位,主要从事精密加工和智能加工技术方面研究。E-mail: linxk333@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)