

文章编号 1004-924X(2011)05-1048-06

## 2X/Y 直线进给轴直线轮廓误差的学习补偿方法

林献坤\*, 于垂顺, 李郝林

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了提高 2X/Y 直线进给轴的联动直线轮廓精度, 研究了进给轴联动直线轮廓偏差的测量、评价和补偿方法。分析了直线电机驱动进给过程存在直线轮廓偏差的原因及其补偿的复杂性, 给出一种基于学习的直线轮廓误差在线精密补偿方法。该方法通过激光干涉仪的 2D 时间基准精密测量龙门联动轴直线轮廓的实时坐标值, 应用最小二乘方法评价确定理想直线方程; 通过与理想直线比较得到直线偏差学习样本, 建立基于最小二乘支持向量回归方法的直线偏差识别模型, 以模型的在线回归计算确定偏差补偿量。最后给出了补偿量控制输出策略与补偿系统构建方案, 并在自构建的直线进给轴平台上进行了在线补偿实验。结果表明, 应用该方法对 2X/Y 直线进给轴联动的直线轮廓偏差进行在线补偿, 可使轮廓精度提高 53%。

**关键词:** 数控机床; 直线进给轴; 直线度误差; 在线补偿; 支持向量回归

**中图分类号:** TG659; TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1048

## Learning-based linear contour error compensation method for 2X/Y-type linear feed axes

LIN Xian-kun\*, YU Chui-shun, LI Hao-lin

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

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

**Abstract:** To improve the linear contour accuracy of 2X/Y gantry linear feed axes, the research of the literature focuses on the straightness accuracy measurement, evaluation and error compensation of the axes. Firstly, the cause of linear contour error in interpolation process and its compensation complexity were analyzed for a 2X/Y gantry feed axis driven by linear motors. Then a learning algorithm based compensation method was applied to increase the contour accuracy for this type of gantry axis. In the method, 2D time function of a laser interferometer was utilized to acquire real-time interpolation error data and least square method was taken to evaluate and determine the ideal linear equation. A model based on least square support vector regression technique was established to recognize the errors. With the support vectors from learning process, the real-time compensation values were acquired through the model regression calculation. Finally, the compensation output strategy and corresponding realization system were also proposed. To demonstrate the procedure of the proposed approach, an experiment was conducted on the self-construction 2X/Y axis feeding platform. The result shows that

收稿日期: 2010-05-19; 修订日期: 2010-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51005158); 上海市科学技术委员会基金资助项目(No. 08110511600)

the combination technique can compensate the interpolation error and increase the straightness accuracy by 53%.

**Key words:** numerical control machine; linear feed axis; straightness error; on-line compensation; support vector regression

## 1 引言

进给轴是构成数控机床的基本要素之一,由直线电机驱动的直线进给轴是一种不需要中间转换机构的传动装置,具有响应速度快,定位精度高,无行程限制,效率高等多种优点<sup>[1]</sup>。其中单直线电机驱动进给机构载着工件沿导轨纵向进给,机床运动部件重量大,难以获得高的加速度;而基于双直线电机驱动的2X/Y龙门移动式进给机构,其工作台可与工件保持静止,机构的运动质量相对较小,可以获得更高的加速度特性,因此得到了越来越多的关注<sup>[2]</sup>。

数控机床进给轴联动产生的直线偏差是机床中的基础几何误差,这种误差会直接复映到工件上,从而影响加工精度<sup>[3]</sup>。研究提高直线轮廓偏差具有现实意义,但在龙门双直线进给轴中存在多方面的因素影响联动轴插补的直线精度,体现在:(1)直线进给轴本身是一个零阻尼的环节,进给轴的运动特性容易受到支撑电机运动的直线导轨摩擦特性及几何精度等因素的影响<sup>[4]</sup>;(2)2X轴依靠数控系统的同步功能来锁定同步,其同步性能与两轴的负载及加速时间有关<sup>[5]</sup>,2X轴的同步性能直接影响X轴向的插补性能;(3)X轴和Y轴之间由于伺服特性的不同,这两者之间产生的跟随误差也不一致,导致插补过程存在直线度偏差<sup>[6]</sup>。结合这3个方面的影响因素可见,产生直线偏差因素具有高非线性,若单纯从理论上建模进行补偿具有较大的困难。

进行误差补偿是提高机床精度的一种有效措施<sup>[7]</sup>,本文研究了该类进给轴的直线度偏差测量和评价方法,并应用具有智能学习的方法,建立了识别这种非线性偏差的识别模型。为提高该类进给轴的联动插补直线轮廓精度,给出了一种在线补偿方法,该方法应用具有较好估计性能的最小二乘支持向量回归机(Least Square Support Vector Regression, LS-SVR)作为直线偏差推理计算工具,探索补偿量的输出控制策略,为直线电机驱

动进给轴在精密数控机床的推广应用起到了推动作用。

## 2 直线度测量及偏差评价

### 2.1 轴坐标动态精密测量原理

激光干涉仪基于雷达原理、多普勒效应及光学外差原理,利用反射镜移动时对激光束反射所产生的激光频率的多普勒频移来进行位移测量。静态轴直线度测量以激光束为基准,实际是用互成角度的两束光干涉的等光程位置作为直线基准进行测量的,而激光干涉仪的2D基准功能则是在轴动态运行过程中,用高采样速率对两束多普勒频移激光同时进行位置测量<sup>[8]</sup>。在采样时间偏差 $<10\ \mu\text{s}$ 进行动态位移测量时,激光多普勒测量仪采用相位探测器来侦测相位偏移,对于每一位移的半波长,积满一个周期,探测器发出一个增位或减位脉冲信号,通过脉冲数可得知位移 $x$ ,其表示为:

$$x = \frac{\lambda_0}{2} (N + \Delta\Phi/2\pi), \quad (1)$$

其中, $\lambda_0$ 为激光波长, $N$ 为积分满一周期 $2\pi$ 的周期数, $\Delta\Phi/2\pi$ 是未满一周期的余量。

依据这样的测量原理,在环境比较稳定的条件下,该方法测量位置的精度可达到 $0.5\ \mu\text{m}$ ,可见,双光束激光干涉仪的2D时间基准功能是一种精密测量两轴动态位置的有效方法。

### 2.2 最小二乘直线偏差评价方法

评定直线度偏差可用两端点法与最小二乘法,在精密评价测量直线度时,两端点法采用误差曲线首末端点连线为理想直线,理想直线受末端点的坐标值影响较大,在动态插补过程中,首端点刚好是进给轴加速过程,容易存在同步微振动现象<sup>[5]</sup>,导致选取首末端点较为困难,影响直线度的评定。而最小二乘法综合插补过程直线的偏差,评价直线是计算偏差平方的最小值。设对于 $n$ 个测量点的坐标表示为 $(x_i, y_i)$ ,则评价直线度的最小二乘直线方程可表示为 $g(x) = kx + t$ ,其中:

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \\ t = \bar{y} - k\bar{x} \end{cases}, \quad (2)$$

其中  $\bar{x}, \bar{y}$  分别是  $x_i, y_i$  的期望值。

用该理想直线评价直线度, 则偏差表示为:

$$e_i = g(x_i) - y_i. \quad (3)$$

### 3 偏差补偿模型及控制策略

#### 3.1 偏差识别的基本原理

为了提高直线偏差补偿的实时性, 需要有较快回归计算性能。最小二乘支持向量回归机作为基于支持向量机方法的一种改进算法, 在在线误差补偿中具有优势<sup>[9-10]</sup>, 它通过构造损失函数将原支持向量回归机中的二次规划寻优变为求解线性方程, 从而大大降低了计算的复杂性, 通过引入 Lagrange 函数, 可把求解问题转化为无约束优化问题:

$$L(\mathbf{w}, b, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^n \xi_i^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [\mathbf{w}^T \phi(x_i) + b + \xi_i - y_i], \quad (4)$$

式中,  $\boldsymbol{\alpha}$  是 Lagrange 因子向量,  $\alpha_i$  是  $\boldsymbol{\alpha}$  中的元素,  $\mathbf{T} = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2 \dots n\}$  为样本集合;  $\mathbf{w}$  是权系数向量;  $C$  是惩罚系数;  $\xi$  是误差量;  $\phi(\cdot)$  是核空间映射函数;  $b$  是偏置量。

再依据 KKT 条件及优化变量的一维导数为 0 联立方程组, 可把式(4)的求优问题转化为求如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & \boldsymbol{\Psi} \\ \boldsymbol{\Psi} & \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中,  $\boldsymbol{\Psi} = [1, 1 \dots 1]^T$ ,  $\boldsymbol{\Omega}$  是  $x_i$  向量核函数内积计算得到的  $n$  阶方阵, 记  $\Omega_{ij} = K(x_i, x_j)$ , 其中,

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  是拟合软化系数。

求得  $\boldsymbol{\alpha}$  和  $b$  之后, 直线偏差的回归估计可简单的用如下式子表示:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) + b. \quad (7)$$

经过回归模型的原理推理可见, 对直线偏差的识别, 已可只依据回归公式(7)中支持向量的核

计算推理得到。

#### 3.2 补偿模型的建立

根据上面对原理性的探讨, 可建立图 1 所示的联动进给轴直线偏差补偿模型, 模型依靠激光干涉仪的 2D 功能进行联动轴坐标值采样, 经过最小二乘算法评价之后, 获得不同 X 坐标位置的直线偏差值样本, 样本向量拟表示为  $(x_i, e_i)$ , 统一计算后, 获得样本向量库, 根据公式(5)的学习计算, 得到支持向量回归参数  $\boldsymbol{\alpha}$  向量、支持向量偏移量  $b$  参数。获得这些参数后, 依据公式(7), 经过回归计算可得到不同 X 轴坐标下直线偏差值。

由于在线补偿过程存在输入信号采集的延迟和控制补偿的时间延迟, 补偿动作用 Y 轴坐标叠加运行方式来补偿, 由于进给轴的伺服控制存在跟随误差, 在补偿上增加了补偿决策环节。

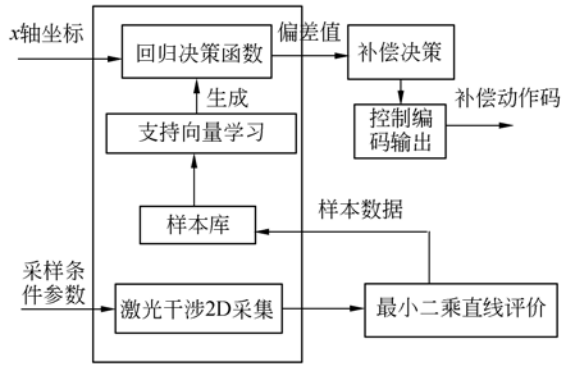


图 1 偏差补偿模型示意图

Fig. 1 Block diagram of contour error compensation model

#### 3.3 补偿控制策略

由于补偿控制是在联动时刻进行叠加补偿实现的, 为防止补偿频率过快, 导致数控系统自身的不稳定, 补偿量以前馈、积分、离散方式进行控制输出, 离散方式以补偿量大于  $1 \mu\text{m}$  才开始给予补偿。其公式表示如下:

$$\begin{cases} \Delta = E = \frac{\int_{x_T+x_i} \delta \delta_{x_0} e_k dx}{|x_T + x_i - x_0|} & |E| \geq 1 \mu\text{m} \\ \Delta = 0 & |E| < 1 \mu\text{m} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\Delta$  是补偿量,  $E$  是在补偿控制输出周期内的直线偏差累积量,  $x_0 \sim x_T$  是一个补偿周期内位置坐标变化值,  $x_i$  是前馈补偿的位置偏移量。

补偿控制码按位进行编码, 实现与数控系统

兼容,编码方式如图 2 所示,图中这种编码方式综合考虑到了补偿信号是否要触发、往哪个方向触发以及补偿多少等控制策略问题。

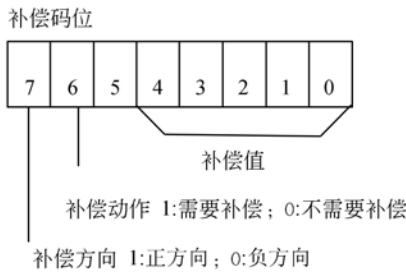


图 2 补偿码位编码方式

Fig. 2 Code framework of compensation control byte

### 4 实验研究及性能分析

#### 4.1 实验方案设置

为了验证上述提出的偏差在线补偿方法,本文建立了图 3 所示的实验方案,方案中 X/Y 轴位置坐标的动态采集应用美国 OPTODYNE 公司的 MCV-505 的激光干涉仪进行测量,2D 基准数据由高速 PCICA 卡进行采集,同步采集频率为 15 Hz,在采集系统上进行数据处理后,直接把采集到的 X、Y 轴坐标数据转化为学习样本数据;再应用 MATLAB 编程构建 LS-SVR 学习机,支持向量机学习采用的相关参数为:  $\sigma=3.0$ ;  $C=0.5$ ; 经过学习后,以文本文件形式提供给在线补偿 PC,PC 机上的模拟量采集卡和开关量采集分别选用 Advantech PCI-1716 和 PCI-1756 高速采集卡,回归计算补偿量的决策体功能由 Visual C++ 开发的软件实现,该软件控制补偿的时间片线

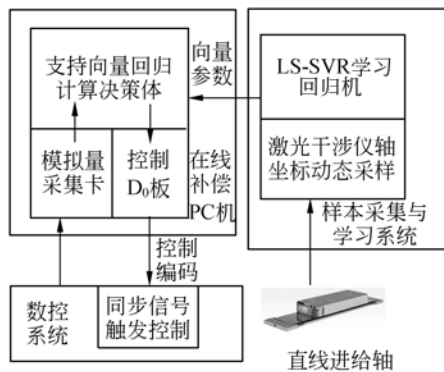


图 3 补偿实验方案

Fig. 3 Experiment scheme of error compensation

程为 10 ms。控制直线轴伺服进给的系统为 SINUMERIK 840D 系统,2X 轴和 Y 轴的驱动直线电机是 1FN3 直线电机。依据这样的实验方案,以自构建的 2X-Y 进给实验台为控制对象,建立图 4 所示补偿实验系统,实验中 X 轴联动的行程为 150 mm,Y 轴联动行程 4mm,前馈补偿位置偏移量  $x_f$  为 10 mm,联动进给速度为 400 mm/min,Y 轴的补偿速度 200 mm/min。



图 4 补偿实验系统

Fig. 4 Framework of compensation experiment system

#### 4.2 结果及分析

经过对激光干涉仪的 2D 采样数据进行处理,得到图 5 所示的直线轮廓偏差评价计算结果,图中 2X-Y 直线进给轴在 150 mm 内进行直线轮廓联动时,直线度偏差为 16  $\mu\text{m}$ ,图中纵坐标表示的是与最小二乘直线比较的偏差值,从图中偏差值的变化趋势可见在实验区段内,直线偏差在  $+10 \sim -6 \mu\text{m}$  波动,且还存在 2  $\mu\text{m}$  左右振幅的叠加高频波,这个信号的存在与联动过程进给轴的振动和激光测量靶的运动稳定性有关,这种干扰分量比起直线偏差还是小值。这表明应用激光干涉仪的 2D 时间基准功能和最小二乘直线偏差评价方法,可以精确评价 X/Y 联动进给轴的动态直线偏差。

应用给出的最小二乘支持向量回归机对处理数据组成的样本进行学习,得到了 82 个支持向量,图中黑点表示的是应用均匀选择的测试样本对直线偏差的学习效果,图中回归学习效果曲线刚好都处在曲线波动带之内,说明 LS-SVR 识别模型已很好地识别了轮廓直线偏差趋势识别,干扰分量也得到了较好的抑制。

利用计算得到的 82 个支持向量,在补偿 PC 上应用公式(7)进行回归计算,计算过程所需要的

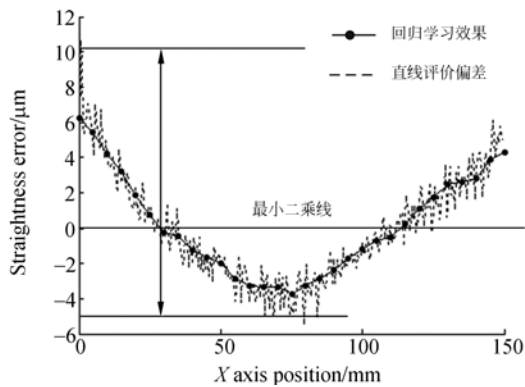


图 5 偏差评价与学习效果

Fig. 5 Error evaluation and recognition

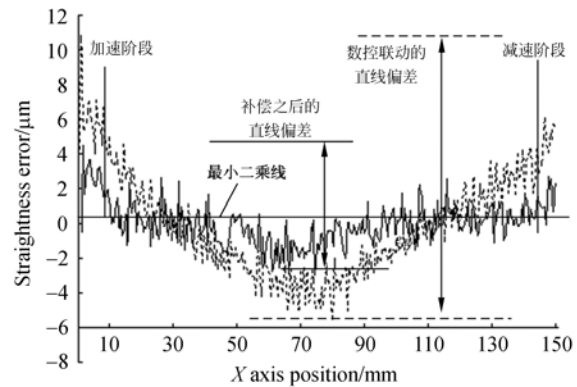


图 6 在线补偿效果比较

Fig. 6 Comparison of on-line compensations

计算时间大约为每一个补偿循环周期内耗时 1 ms 左右,这说明经过学习之后回归方程的计算性能满足在线补偿要求。在进给过程中启动在线补偿,并应用测量直线偏差样本时的相同方法进行在线补偿性能测量,得到了图 6 所示的补偿效果比较图。

图中实线是补偿之后的直线偏差变化情况,经过数据处理,可以看出补偿之后直线偏差减少为  $7 \mu\text{m}$ ,与数控系统单独联动的直线偏差比较,轮廓的直线度提高了 53%;进一步的比较还可以看出,在进给轴加速阶段,由于 2X 同步轴带的同步误差引起的直线偏差得到了一定的补偿;另外直线度的整体提高也说明了联动过程中由于导轨因素以及 X, Y 伺服驱动特性的不一致性问题带来的直线插补误差也在一定程度上得到了抑制。

#### 参考文献:

- [1] LI X L, DU R, DENKENA B, *et al.*. Tool breakage monitoring using motor current signals for machine tools with linear motors [J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1403-1408.
- [2] 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.
- [3] 张立新, 黄玉美, 乔雁龙. 并联轴直线运动直线度的检测与误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 220-225.

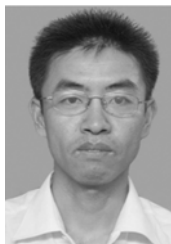
## 5 结 论

本文探讨了 2X/Y 直线进给轴直线轮廓偏差的精密测量方法,并应用 LS-SVR 方法对进给轴联动的轮廓直线偏差进行了补偿。首先给出了基于激光干涉仪的 2D 时间基准功能和最小二乘直线偏差评价方法,该方法实现了 X/Y 联动进给轴的轮廓直线偏差的精确评价;然后应用 LS-SVR 识别模型对轮廓直线偏差趋势进行了识别研究,结果表明,提出的模型对 2D 基准测量出的干扰分量实现了有效抑制;最后在此基础上,融合应用积分、前馈、离散的补偿控制策略与基于学习的动态补偿方法,实现了联动直线偏差在线补偿。实验表明,该方法可使 2X/Y 直线进给轴联动直线轮廓精度提高 53%。

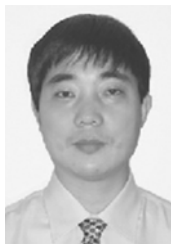
- ZHANG L X, HUAN Y M, QIAO Y L. Interferometry measurement and errors compensation of straightness for parallel axis with straight-line motion [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 220-225. (in Chinese)
- [4] YAN M T, HUANG K Y, SHIU Y J, *et al.*. Disturbance observer and adaptive controller design for a linear-motor-driven table system [J]. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2007(35): 408-415.
- [5] 袁博, 林献坤. 基于 Gantry 驱动的双直线电动机高速动态同步误差性能测试研究[J]. *制造技术与机床*, 2010, (2): 1-5.
- YUAN B, LIN X K. Dynamic synchronous error test for dual linear motor with high feed rate based

- on gantry axes function [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010, (2): 1-5. (in Chinese)
- [6] UCHIYAMA N, NAKAMURA T, YANAGIUCHI H. The effectiveness of contouring control and a design for three-dimensional machining [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2009, 49: 876-884.
- [7] 花世群, 骆英. 基于干涉原理的高精度直线度误差测量[J]. *中国激光*, 2006, 33(1): 76-80.  
HUA S Q, LUO Y. High precision measurement of alignment error based on theory of interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(1): 76-80. (in Chinese)
- [8] OPTODYNE, INC. *Laser Doppler displacement meter user's guide (MCV-500)* [M], 2005.
- [9] 林伟青, 傅建中, 陈子辰, 等. 数控机床热误差的动态自适应加权最小二乘支持矢量机建模方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 178-182.  
LIN W Q, FU J Z, CHEN Z C. Modeling of NC machine tool thermal error based on adaptive best-fitting WLS-SVM [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 178-182. (in Chinese)
- [10] 李绍成, 左洪福, 张艳彬. 油液在线监测系统中的磨粒识别[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 589-596.  
LI S C, ZUO H F, ZHANG Y B. Wear debris recognition for oil on-line monitoring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 589-596. (in Chinese)

#### 作者简介:



林献坤(1975—),男,福建仙游人,博士,讲师,1998年、2001年于江苏大学分别获得学士、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的研究。E-mail: linxk333@126.com



李郝林(1961—),男,陕西延长人,博士,教授,博士生导师,1982年、1985年于陕西机械学院分别获得学士、硕士学位,1990年于西安交通大学获得博士学位,主要从事数控技术、精密检测与智能控制方面的研究。E-mail: haolin@usst.edu.cn



于垂顺(1986—),男,山东青岛人,学士,2009年于河北工程学院获得学士学位,主要从事智能检测和模式识别的研究。E-mail: haha840@126.com