文章编号: 1006-4710(2011)03-0271-04

重型数控卧式车床定位精度的激光测量与误差补偿

王胜^{1,2},刘宏昭¹,原大宁¹

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西工商职业学院 工程管理系, 陕西 西安 710119)

摘要:在分析重型车床定位精度的激光测量原理和方法的基础上,采用激光干涉仪对 X 轴的定位 精度和重复定位精度进行了测量,做出 X 轴的平均偏差特性曲线,获得其线性位移误差数学模型, 利用最小二乘法得到 X 轴定位精度误差补偿模型,并进行了有效补偿。实例结果表明,本文方法 有效且可行。

Laser Measurement and Errors Compensation of Position Accuracy for CNC Heavy-Duty Horizontal Lathe

WANG Sheng^{1,2}, LIU Hongzhao¹, YUAN Daning¹

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xian University of Technology Xian 710048, China;2. Department of Engineering Management, ShaanXi Business College, Xian 710119, China)

Abstract: Based on the detailed analysis of the principle and way of laser measurement for position accuracy of CNC heavy-duty horizontal lathe, the laser interferometer is used to carry out the measurement of position accuracy and re-position accuracy in the *X*-axis direction so as to work out the average deviation characteristic curves in the *X*-axis and to obtain the mathematical model of its linear displacement errors. Also, the least square method is used to obtain the *X*-axis position accuracy error compensation model; and the effective compensation is made. The results from the real examples indicate that this method is effective and feasible.

Key words: CNC heavy-duty lathe; laser measurement; position accuracy; errors compensation

重型数控机床的定位精度和重复定位精度是影响加工精度的重要因素^[1]。提高数控机床的加工 精度有两种基本方法:误差预防法和误差补偿 法^[2]。误差预防法是通过设计和制造途径消除或减 少可能的误差源,该方法具有很大的局限性,即使可 能,在经济上的代价也是非常昂贵的。误差补偿法 是针对存在的原始误差在相应的负方向上利用计算 机制造一种新的误差,对其加以抵消。因此,误差补 偿已成为提高机床精度和机床性能的重要途径。

机床误差补偿研究主要包括误差测量和精度建 模两个方面。几何误差的检测和识别是进行误差补 偿的第一步^[3]。通过检测建立误差模型,运用软件 在机床运动中由控制系统进行数值补偿来提高数控 机床运动精度是提高机床精度的重要方法。

精确的数控机床定位精度检测结果对误差补偿 尤为重要。检测机床精度的方法很多,传统的方法采 用金属线纹尺或步距规、电子测微计和准直仪等工具 进行测量^[45]。本研究课题的研究对象是重型数控车 床,其规格大,这些方法不易满足,受环境温度的影响 大且精度低,检测过程冗长。本实验采用近年来应用 较多的双频激光干涉仪进行测量^[67]。

目前,几何误差建模方法主要有三角几何法、误 差矩阵法、二次关系模型法、机构学建模法、神经网 络建模法、刚体运动学法、多体系统理论、最小二乘

作者简介:王胜(1974-),男,陕西西安人,讲师,博士生,研究方向为数控机床可靠性。E-mail:lzwangsheng@sina.com。 刘宏昭(1954-),男,山西代县人,博士,教授,博导,研究方向为机电系统建模、测试、仿真与控制。E-mail:liuhongzhao@xaut.edu.cn。

收稿日期: 2011-04-08

基金项目:国家科技重大专项计划基金资助项目(2009ZX04014-015);陕西省教育厅基金资助项目(2010JK701)。

法等^[8]。本文以某重型数控车床为研究对象,采用 双频干涉法对其 X 向进给系统定位精度进行检测, 根据检测结果,通过最小二乘拟合 X 向位移定位误 差模型,并进行误差补偿。

1 测量原理与方法

1.1 测量原理

以 RenishawXL10 激光干涉仪测量机床的线性 位移误差为例,其测量原理如图1所示。激光束由 XL10 激光发射器产生,这一束单频激光波长为 0.633 μm,在真空状态下,波长稳定性在长时间范 围内能够优于10~4 nm。





当这一束激光到达分光镜时,它被分成反射 光束和发射光束。这两束光传播到反射镜后,都被 反射到分光镜的同一个位置,分光镜对两个光束进 行调制后,直接把光束传送到激光发射器中,从而 使这两束光在探测器中产生干涉条纹。根据光的叠 加和干涉原理,凡光程差等于波长整数倍的位置,振 动加强,产生明条纹;凡光程差等于半波长奇数倍的 位置,振动减弱,产生暗条纹。要对线性测量进行设 定,使用随附的两个外加螺丝将其中的一个线性反射 镜安装在分光镜上。这个组合装置称为"线性干涉 镜",它形成激光光束的参考光路。线性干涉镜放置 在 XL 激光发射器和线性反射镜 2 之间的光路上。

来自 XL 激光器的光束进入线性干涉镜,在此 光束被分成两束。一束光(称为参考光束)被引向 线性反射镜1,另一束光(测量光束)则穿过分光镜 到达线性反射镜2。然后,两束光都被反射回分光 镜,在此它们重新组合并被导回到激光头,激光头内 的探测器监测两束光之间的干涉。

在线性测量过程中,一个光学组件保持静止不动,另一个光学组件沿线性轴移动。通过监测测量 光束和参考光束之间的光路差异的变化,产生定位 精度测量值(注意,它是两个光学组件之间的差异 测量值,与 XL 激光器的位置无关)。此测量值可以 与被测机器定位系统上的读数比较,获得定位误差。

1.2 测量方法

根据重型车床结构和现场实际情况,将反射镜、 线性干涉镜和激光器按照要求布置,反光镜安装在 车床移动部件上作为移动光学镜,干涉镜为固定镜 组。环境补偿单元放置于机床底座上。

本实验的测量对象重型数控车床,其X轴测量 范围为0~1000mm,测量目标的选择根据 GB/T17421.1-2000中的规定,选择目标测量点不少 于5个的要求,设定每个目标位置在每个方向上测 量5次,在一个测量循环为车床X轴工作台正反向 往返移动300mm,采样间隙为50mm。测量时,沿 X轴运动的反射镜相对于固定的干涉镜移动一个采 样间隙并停留设定时间,激光器发出双频激光束,经 $\lambda/4$ 波片射入线性干涉镜,得到二束正交的同偏振 单频激光束,干涉经光波片、分光镜、光电接收器、数 据采集卡接入计算机。现场测试布置如图2所示。



图 2 双频激光干涉仪现场测试布置图 Fig. 2 Arrangement diagram of frequency laser interferometer site test

线性反射镜 2(固定在刀架上)相对于线性干 涉镜进行运动,光程差满足式(1)时,干涉条纹就产 生周期性的明暗变化,通过计算可得 X 轴的实际移 动距离,将其与理论移动距离比较即可得定位误差, 进而可得到重型车床刀架 X 轴的定位精度和重复定 位精度。

$$N = \frac{2\Delta Lm \cdot n}{\lambda} \tag{1}$$

式中,N为干涉条纹产生明暗变化的周期数,m为光路的倍频数,n为电路的倍频数, ΔL 为采样间距, λ 为激光波长。

 $\delta = X - X_0 \tag{2}$

$$R = (R_i)_{\max} \tag{3}$$

$$R_j = 4S_j \tag{4}$$

$$S_{j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_{ij} - \overline{X}_{j})^{2}}$$
(5)

式中, δ 为测量目标准直误差,X为X向实际移动位移,

 X_0 为 X 向理论移动位移,R 为车床单向重复定位精度, R_j 为某一位置的单向重复定位精度, S_j 为标准偏差,n为测量次数, X_{ij} 为单向趋向测量位置的实际偏差, $\overline{X_j}$ 为 数控车床 X 轴单向趋向测量位置的平均偏差。

2 误差分析

由于本论文的研究对象为某重型数控卧式车 床,主要针对其X向进给方向的定位精度进行测量。 要求激光器、线性干涉镜和反射镜2处于一条直线 且该直线与运动轴线平行。某重型卧式车床其X向 进给位移较普通车床长。机床的X向传动装置在安 装时存在制造和安装误差。因此阿贝误差与准直误 差是本研究的重点。

2.1 阿贝误差

双频激光干涉仪在进行激光测量时,要求激光 光束与数控直线运动轴线平行,但在实际测量时,测 量光束与直线运动轴线存在一个偏移距离,称为阿 贝臂,由于机床的工作台导轨存在制造误差,使测量 系统干涉镜相对于基准轴会相差一个角度,会产生 一个光程差,即阿贝误差 *ε*。

$$\varepsilon = S \cdot \tan\theta \tag{6}$$

式中,S为标准偏差, θ为反射镜的偏转角度。

2.2 准直误差

激光干涉仪在测量定位精度时,要求激光束与 数控直线运动方向平行,但由于横向进给运动距离 长及安装、定位等因素的影响,两者之间存在一个夹 角 β ,所以,对于准直误差 δ ,就存在着关系式(2) 和(7)。

$$X_0 = \frac{X}{\cos\beta} \tag{7}$$

因此,在检测过程中,应采取措施减少以上两种 误差。Renishaw 激光干涉仪通过采取一定的数学模 型补偿,其线性测量精度可以达到 ±0.7×10⁻⁶ mm, 分辨率达 0.001 μm,可以满足本实验测试需要。

3 横向误差补偿实例

3.1 误差补偿步骤

根据上述定位精度测量原理及方法,对某型重 型车床 *X* 轴的定位精度和重复定位精度进行测量。

根据测试数据,得到定位精度正、反向均位误差 曲线。

由 X 向均位误差曲线进行曲线拟合,得到正、 反向误差数学模型。

据此模型获得目标点的补偿值,并利用最小二 乘法拟合得到 X 向定位误差补偿模型和补偿值。

3.2 建立误差模型

根据上述误差补偿步骤及测试数据,利用 MATLAB软件建立数学模型。

1) 输入各参量的测试值,用 MATLAB 语言中的 plot(*x*,*y*)函数的曲线关系图,得到定位精度和单向均位曲线偏差特性图,如表1和图3所示。

表 1 定位精度值							
Tab. 1 Values of accuracy							
测试循环	定位精度值/μm						
次序	测试点1	测试点2	测试点3	测试点4	测试点5	测试点6	测试点7
第1次	5.3	12.7	20.5	27.3	31.1	33.2	35.8
第2次	2.0	10.5	18.6	26.4	29.5	32.3	35.2
第3次	2.5	9.1	18.2	23.9	27.2	30.5	34.1
第4次	3.6	10.3	18.9	25.8	29.2	31.5	34.9
第5次	3.2	10.2	18.7	25.5	28.7	31.1	34.4



图 3 X 向单向均位偏差特性图 Fig. 3 Curves of position deviation for X axis

2)根据图3曲线,设定相关参数,使数据点的 平方差最小,进行最小二乘曲线拟合,得到正、反向 误差数学模型分别如式(8)、(9)所示。

$$y_1 = 1.273 \times 10^{-8} x^4 - 7.579 \times 10^{-6} x^3 +$$

$$0.\ 0011x^2 + 0.\ 107x + 2.\ 778 \tag{8}$$

$$y_2 = 9.008 \times 10^{-9} x^4 - 5.464 \times 10^{-6} x^3 +$$

$$0.\ 0007x^2 + 0.\ 1218x + 0.\ 5433 \tag{9}$$

式中,*y*₁、*y*₂分别为目标对应点在正向和反向的定位误差,*x*为目标点位置。

3)要提高定位精度,使X轴正、反向定位误差 为零,即y₁、y₂为零。计算得到目标点对应的补偿值 $y_3 = -3.722 \times 10^{-9} x^4 + 2.115 \times 10^{-6} x^3 - 2.235$ (10)



图 4 X 向补偿特性曲线 Fig. 4 Character curve of error compensation for X axis

3.3 补偿结果分析

根据式(10)和补偿特性曲线,通过将补偿值输 入至伺服控制系统中,重新测量其定位精度,如图 5 所示,得到其正、反向定位精度分别为 2.948 μm、 2.444 μm,达到了补偿误差及提高定位精度的 目的。



图 5 X 向补偿后定位精度曲线 Fig. 5 Accuracy curve of error compensation for X axis

4 结 语

本文以重型数控车床为研究对象,对其 X 轴向 进给运动的定位精度和重复定位精度进行了测量, 根据测量结果运用最小二乘法建立了 X 轴误差数 学模型,作出了定位精度和单向均位误差曲线,实现 了误差补偿及提高定位精度的目标。

参考文献:

 [1] 张立新,黄玉美,乔雁龙. 混联机床并联轴定位精度的激光测量与误差补偿[J]. 农业机械学报,2008,39(2): 163-166.

Zhang Lixin, Huang Yumei, Qiao Yanlong. Laser measure-

ment and errors compensation of position accuracy for parallel axis on hybrid NC machine tools [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 163-166.

- [2] 刘又午,刘丽冰,赵小松,等.数控机床误差补偿技术研究[J].中国机械工程,1998,9(12):48-52.
 Liu Youwu,Liu Libing, Zhao Xiaosong, et al. Research on CNC machine error compensation technology [J]. China Mechanical Engineering,1998,9(12):48-52.
- [3] 沈兴全,张清. 三坐标数控机床精度检测与误差补偿
 [J].测试技术学报,2005,19(3):264-268.
 Shen Xingquan,Zhang Qing. Geometry precision check and measure on three-axis numerical controlled machine tools and errors compensation[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005,19(3):264-268.
- [4] 孟凯,乔炜,骆朝辉. 先进检测仪器在数控机床精度验收中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2003,11
 (5):76-77.

Meng Kai, Qiao Wei, Luo Zhaohui. Apply of advanced testing instruments in the acceptance of CNC machine precision [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003, 11(5):76-77.

- [5] Suzuki T, Kobayashi K, Sasaki O. Real-time displacement measurement with a two-wave length simulation phase modulating laser diode interferometer [J]. Appl Opt ,2000,39 (16):2646-2652.
- [6] Chen B, Zhu R, Wu Z, et al. Nanometer measurement with a dual Fabry-Perot interferometer[J]. Appl Opt, 2001, 40 (31):5632-5637.
- [7] 杨春生,张涛,成俊康,等.双纵模双频激光干涉仪的非 线性对测量精度的影响[J].吉林大学学报:工学版, 2008,38(3):561-564.

Yang Chunsheng, Zhang Tao, Cheng Junkang, et al. Influence of nonlinearity on measuring precision of dual frequency laser interferometer with two longitudinal modes [J]. Journal of Jilin Polytechnic University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(3):561-564.

[8] 范晋伟. 运用多体系统运动学理论建立数控机床空间误差模型[J]. 北京工业大学学报,1999,25(2):38-44.
Fan Jinwei. Volumetric error modelling method for NC machine based on multi-body system kinematics[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1999,25(2):38-44.

(责任编辑 王卫勋)