

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.008

全闭环数控回转轴定位精度研究*

董维新,姚 瑶

(陕西秦川机械发展股份有限公司, 陕西 宝鸡 721009)

摘要: 针对全闭环数控回转轴的关键检测元件—圆光栅的安装误差引起回转轴定位精度差的问题,基于圆光栅测量角度的工作原理,分析了圆光栅在安装时由于光栅定位端面的跳动误差对莫尔条纹的影响规律,推导出了相应的数学关系,建立了回转轴定位误差与光栅定位端面的跳动误差之间的数学模型。数值仿真表明当圆光栅出现端面定位安装误差后,回转轴回转一周,输出的莫尔条纹光强变化经历了一个周期,近似为一正弦曲线。针对上述理论分析,在加工中心回转轴C轴上进行了实验研究,结果表明,通过调整圆光栅端面的跳动误差从原来的70 μm 到16 μm ,利用高精度单频激光干涉仪对回转轴的定位误差进行了检测,两次测量的定位误差曲线均为正弦曲线,且回转轴的定位精度提高了3倍。研究结果表明,减小圆光栅定位端面的轴向跳动误差可有效提高回转轴的定位精度。

关键词: 定位精度; 圆光栅; 端面跳动; 误差分析

中图分类号: TH161; TB92 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)12-1481-04

Study on positioning accuracy of closed loop NC rotary axis

DONG Wei-xin, YAO Yao

(Qinchuan Machinery Development Co., Ltd., Baoji 721009, China)

Abstract: In order to solve the problem of the poor positioning accuracy of rotary axis affected by the installation error of circular grating—the key measuring element of fully-closed-loop NC rotary axis, based on the operating principle of angle measurement with circular grating, the influence law of moire fringe affected by the run-out of positioning end face of grating during the installation was analyzed thoroughly, a cooresponding mathematic relationship was deduced and a mathematical model between rotary axis positioning error and run-out error of positioning end face of grating was established as well. Numerical simulation shows that once the installation error of positioning end face of circular grating occurs, the output light intensity variation of moire fringe goes through a cycle, which approximats a sine curve. Adjusting the former run-out error value of end face of circular grating from 70 μm to 16 μm , the positioning error of rotary axis was measured with high precision single frequency laser interferometer, the error curves of measuring results were both sine curves and the positioning accuracy was increased 3 times over before. So correctness of the theoretical analysis was verified. At the same time, the experimental results indicate that reducing the axial run-out error of positioning end face of circular grating can improve the positioning accuracy of rotary axis effectively.

Key words: positioning accuracy; circle grating; end face run-out; error analysis

0 引 言

随着我国经济的飞速发展,作为新一代工作母机的数控机床凭借其高自动化、高效率、高精度、高速

度、高可靠性等优点在装备制造业中得到了广泛应用,并迅速发展和普及。随着精密加工技术的迅速发展和零件加工精度的不断提高,对数控机床的精度也提出了更高的要求。

数控机床的定位精度是机床精度的一项重要指

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04001081)

作者简介: 董维新(1972-),男,陕西宝鸡人,主要从事大型数控精密机床的开发与应用方面的研究. E-mail:dwx1972@163.com

标,指所测量的机床运动部件在数控系统控制下运动所能达到的位置精度^[1]。它综合反映了机床构件和进给系统的精度及动态特性,它与机床的几何精度共同对机床切削精度产生重要的影响,尤其对孔隙加工中的孔距误差具有决定性的影响。一台数控机床可以从它所能达到的定位精度判断出它的加工精度,所以对数控机床的定位精度进行检测是保证加工质量的必要途径^[2-3]。

随着我国装备制造业加工水平的不断提高,数控机床的定位精度日益提高。原来精密滚珠丝杠加编码器式的半闭环控制系统,由于其无法控制机床传动机构传动时所产生的传动误差、高速运转时所产生的热变形误差以及加工过程中传动系统产生的磨损误差,已不能满足用户的需求。通过将计量光栅作为位置检测元件置于被测坐标轴的终端移动部件上进行全闭环控制,则可以消除上述误差,提高机床的定位精度以及精度的可靠性,使机床处于最佳精度状态,从而保证零件的加工质量。

文献[4]提出了一种基于图形拟合的小型光电编码器细分误差补偿的新方法;文献[5]对混联机床主旋转轴精度评价进行了研究,该作者分析了激光干涉仪在机床主旋转轴测量中测量精度的主要影响因素和误差补偿,提出了一种简便、可靠的检测方法;文献[6]基于正弦函数和粒子群算法提出了一种误差补偿及参数辨识方法,用于提高圆光栅角度传感器的测量精度。

国内其他学者针对圆光栅存在运动偏心、角度倾斜等误差时所造成测量误差进行了分析并研究了其补偿方法^[7-9]。

本研究以圆光栅作为全闭环数控机床回转轴的位置检测元件,以伺服电机为驱动部件,由所开发的智能光栅测控软件对机床工作台进行定位控制,对其端面跳动引起的定位精度变化进行深入的研究。

1 测量原理

回转轴定位精度测量装置为圆光栅副,其结构如图1所示。一般情况下,标尺光栅随测量轴一起转动,指示光栅与光电元件固定不动。标尺光栅与指示光栅相对移动便产生莫尔条纹明暗的变化^[10]。

设初始位置为接收亮带信号,当光栅移动一个栅距,莫尔条纹便移动一个纹距,对应光的明暗变化就经历一个周期,且光强变化近似一个正弦波,光强(输出电器)同角位移的关系如图2所示。光电元件把接收到的光强信号转化为同频率的电压信号输出,输出与位移的关系表示为:

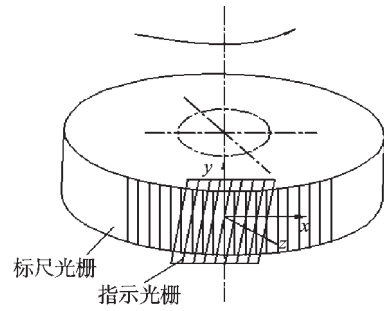


图1 圆光栅结构示意图

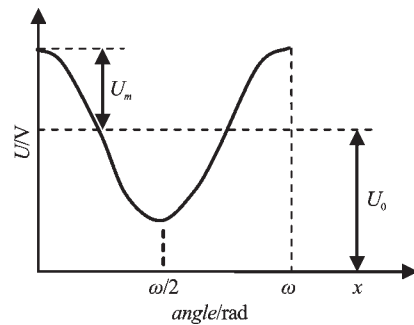


图2 光强(输出电压)同角位移的关系

$$u = U_0 + U_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x}{\omega}\right) \quad (1)$$

式中: u —输出电压, U_0 —直流电压分量, U_m —交流电压分量, x —相对位移, ω —栅距。

通过整形电路处理,每产生一个周期的正弦波,就输出一个脉冲,脉冲数和条纹数以及移动过的栅距数是一一对应的。只要记录移动过的莫尔条纹数 N ,就知道光栅的位移量 x 。这就是利用光栅莫尔条纹测量位移的原理,如下式所示:

$$x = N\omega \quad (2)$$

在测量过程中,由于装配面的轴向跳动间隙等原因使得被测轴在转动时标尺光栅与指示光栅沿轴线产生相对移动,从而引起莫尔条纹明暗发生变化。

2 误差分析及仿真

假设标尺光栅轴线偏斜了 β 角(即标尺光栅的几何轴线与被测轴的旋转轴线在 $X-Y$ 平面内的夹角),标尺光栅倾斜后光栅副的正视图如图3所示。

$\beta=0$ 和 $\beta \neq 0$ 时光栅副形成的莫尔条纹示意图如图4(a)所示。标尺光栅和指示光栅栅距相等即 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 。建立直角坐标系,取 $\beta=0$ 时标尺光栅的任一栅线为 Y 轴,与其垂直的方向为 X 轴。令 m 、 n 分别表示指示光栅和标尺光栅的栅线, m 、 $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 原点 o 为 $m=0$ 栅线与 $n=0$ 栅线的交点。则莫尔条纹的亮条纹 I、II 可视为两光栅栅线交点的轨迹即可用一系列序数 $(m, n=m)$ 表

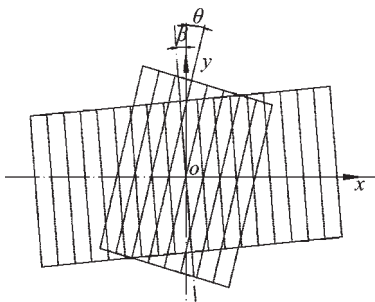
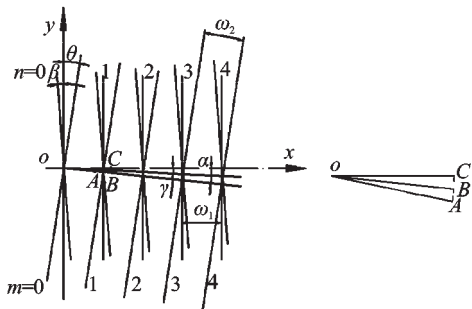


图3 标尺光栅倾斜的光栅副的正视图



(a) $\beta=0$ 和 $\beta \neq 0$ 时光栅副形成的莫尔条纹示意图 (b) ΔOAC

图4 莫尔条纹示意图

示出来。 $\beta=0$ 即理想情况下,两光栅夹角为 θ ,交点连线 I 是莫尔条纹的亮条纹,它与 X 轴的夹角为 α 。在 X-Y 坐标系下,标尺光栅的栅线方程为:

$$x = n\omega_1 \tag{3}$$

其中: $x \in (-\infty, +\infty)$ 。

指示光栅的栅线方程为:

$$y = \cot \theta \cdot x - \frac{m\omega_2}{\sin \theta} = (x - \frac{m\omega_2}{\cos \theta}) \cot \theta \tag{4}$$

由 $m=n$, $\omega_1=\omega_2=\omega$,解得莫尔条纹 I 的方程为:

$$y = (-\tan \frac{\theta}{2})x \tag{5}$$

由式(5)得条纹斜率为:

$$\tan \alpha = -\tan \frac{\theta}{2} \tag{6}$$

即 $\alpha = -\theta/2$,表示莫尔条纹的方向在栅线夹角补角的角平分线上。设莫尔条纹的纹距为 B ,则可得:

$$B = \frac{\omega}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \tag{7}$$

$\beta \neq 0$ 即存在装配误差,设两光栅夹角为 θ' ,则 $\theta' = \theta + \beta$ 。交点连线 II 是莫尔条纹的亮条纹,它与 X 轴的夹角为 γ 。同理可得,在 X-Y 坐标系下,莫尔条纹 II 的方程为:

$$y = (-\tan \frac{\theta + \beta}{2})x \tag{8}$$

那么, $\gamma = (\theta + \beta) / 2$ 。设莫尔条纹的纹距为 B' ,则:

$$B' = \frac{\omega}{2 \sin \frac{\theta'}{2}} = \frac{\omega}{2 \sin \frac{\theta + \beta}{2}} \tag{9}$$

通过比较可以看出,出现装配误差之后,莫尔条纹的亮条纹方程及纹距都发生了变化,因此,光电元件接收到的光强和实验结果(测量回转轴定位精度)随之发生相应变化。

如图4(a)所示,本研究设 $m=1$ 栅线与 I 线的交点为 A,与 II 线的交点为 B,与 X 轴的交点为 C,所围成的三角形 ΔOAC 如图4(b)所示。

由余弦定理可得:

$$\overline{AB} = \frac{\overline{OA} \cdot \sin \angle AOB}{\sin \angle OBA} = \frac{x \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta + \beta}{2}} \tag{10}$$

而 \overline{AB} 在莫尔条纹移动方向上的分量为:

$$\overline{AB'} = \overline{AB} \cdot \cos \frac{\theta}{2} = x \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\theta + \beta}{2}} \tag{11}$$

通过式(1)即可得此时光电元件输出的电压信号与位移的关系如下:

$$u = U_0 + U_m \sin(\frac{\pi}{2} + \frac{4\pi}{\omega} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot x \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\theta + \beta}{2}}) \tag{12}$$

设标尺光栅倾斜后记录的莫尔条纹数为 N' ,莫尔条纹的计数误差为 ΔN 。莫尔条纹移动一个纹距,便记录一个移动过的莫尔条纹数 N 。因此,由式(7, 9)可得:

$$\Delta N = N - N' = N - \frac{B'}{B} \cdot N = (1 - \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta + \beta}{2}}) \cdot N \tag{13}$$

本研究在计算机中对分析结果进行数值仿真。设初始位置为接收亮带信号,所选参数使得圆光栅旋转一周莫尔条纹恰好移动一个纹距。出现安装误差后,输出的莫尔信号位移特性计算结果如图5所示。随着标尺光栅的旋转,莫尔条纹的光强由亮进入稍

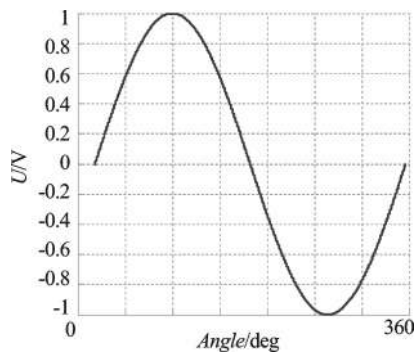


图5 光栅倾斜时莫尔条纹位移特性

暗,然后半亮半暗,全暗,半暗半亮,稍暗,全亮。即光强变化经历了一个周期,近似为一正弦曲线。

3 实验及分析

本研究利用圆光栅作为全闭环数控机床回转轴的位置检测元件,使用RENISHAW单频激光干涉仪对其定位精度进行测量实验,检测实验装置如图6所示。图6中所示单频激光干涉仪型号为RENISHAWML10。当圆光栅的端面跳动量为70 μm时,数控机床回转轴定位精度和重复定位精度的数据曲线如图7(a)所示,该曲线形状近似为一正弦曲线,与计算机数值仿真结果相一致。

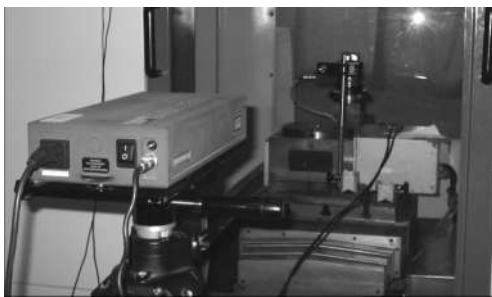


图6 数控机床回转轴定位精度实测图

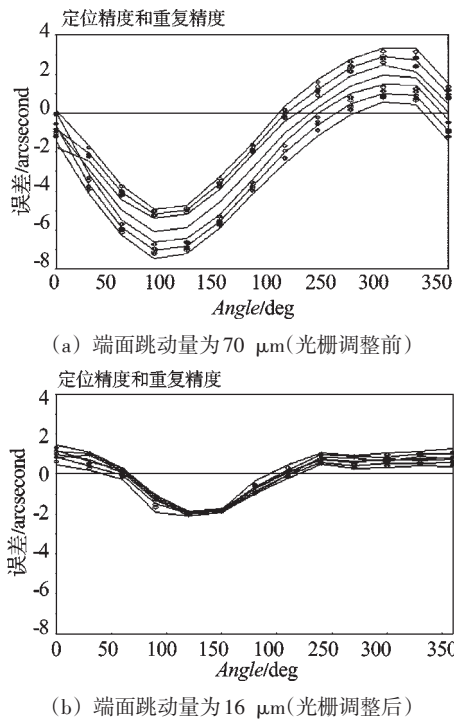


图7 定位精度和重复定位精度实验曲线对比

该实验中,调整标尺光栅的安装位置,使得其端面跳动量减小到16 μm时,数控机床回转轴定位精度和重复定位精度的实验结果曲线如图7(b)所示。

通过比较可以看出,图7(b)所示的定位精度误差曲线相对平坦,幅值较小。标尺光栅的端面跳动量从70 μm减小到16 μm以后,回转轴定位精度的各项指标都相应提高了,其中定位精度大约提高了3倍,重复定位精度提高约1 arcsecond。

4 结束语

本研究探讨了利用光栅测量数控机床回转轴定位精度的过程中,标尺光栅安装基面的端面跳动对回转轴定位精度的影响,并通过计算机数值仿真和测量实验验证了该结论的正确性。

研究表明,利用圆光栅测量数控机床回转轴定位精度对数控机床回转轴定位精度的误差补偿和误差源判断的研究有重要的实用价值。

参考文献(References):

- [1] 刘焕牢. 数控机床几何误差测量及误差补偿技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2005.
- [2] GINIOTIS V, GRATTAN K T V. Optical method for the calibration of raster scales[J]. *Measurement*, 2002, 32(1): 23-29.
- [3] 韩仲卿, 杨 圣. 基于同心圆光栅的远心三维测量系统[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 920-925.
- [4] 孙 莹, 万秋华, 余容红. 小型光电编码器细分误差补偿法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(7): 605-611.
- [5] 张立新, 黄玉美, 杨新刚, 等. 混联复合机床主旋轴精度的光电检测与补偿[J]. *计量学报*, 2007, 28(2): 102-105.
- [6] 高贯斌, 王 文, 林 铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1766- 1771.
- [7] 艾晨光, 褚 明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅圆心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2479-2484.
- [8] 王 文, 林 铿, 高贯斌, 等. 关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 135-141.
- [9] 唐 松, 方 明, 姚 磊. 安装偏心对圆光栅测角精度的影响及误差补偿技术研究[J]. *计量与测试技术*, 2013, 40(6): 11-12.
- [10] 洪小苗, 郭培基. 基于圆光栅莫尔条纹的 CGH 元件对准[J]. *激光杂志*, 2012, 33(4): 22-24.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

董维新,姚 瑶. 全闭环数控回转轴定位精度研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(12): 1481-1484.

DONG Wei-xin, YAO Yao. Study on positioning accuracy of closed loop NC rotary axis[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1481-1484.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>