

干涉测量的误差分析与并联机床的准确度测量*

张立新^{1,2}, 黄玉美¹, 王峰¹

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 石河子大学 机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘 要:对雷尼绍激光干涉仪的线性测量原理进行了详细探讨,分析了干涉仪在线性测量中的主要影响因素和误差诱因;作出了线性测量的准直误差特性曲线和阿贝误差特性曲面,并利用最小二乘法拟合得到了干涉仪准直测量误差的数学模型和沿 u 、 v 方向离散的阿贝误差特性曲线方程;给出了一种建立误差数学模型的方法. 采用激光干涉仪检测了并联数控机床直线轴的运动准确度,并提出了一种适合于并联机床直线轴定位准确度测量的干涉测量方法.

关键词:激光干涉仪;误差分析;并联机床;干涉测量

中图分类号: TB92; TN24; TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2008)06-1224-5

0 引言

干涉测量具有灵敏度高、分辨率高、抗干扰能力强、测量准确度高等特点,激光干涉仪已成为国际机床标准中规定使用的数控机床准确度检测验收的测量设备^[1]. 准确度是衡量机床性能优劣的主要指标之一,准确度检测主要是为了对机床进行评价验收和准确度补偿控制. 数控轴线的定位准确度和重复定位准确度是机床准确度检测的一项重要检测项目. 雷尼绍激光干涉仪以其极高的测量准确度、灵活性和具有对国际标准的全面溯源性而为国际公认为高水平激光干涉仪之一. 以往的研究对雷尼绍激光干涉仪的线性测量原理、准确度影响因素及其误差分析涉及不够深入. 本文针对雷尼绍干涉仪线性测量原理、影响测量准确度的因素^[2]和误差补偿进行了深入探讨,并结合实验室开发的并联机床,采用雷尼绍激光干涉仪对其直线轴运动准确度进行检测,提出了一种简便易行的直线轴运动准确度检测方法.

1 测量原理

干涉仪激光器发出的经稳频的相干激光束 A 射入干涉仪中的分光镜,被分为两道光束. 一道光束 C (参考光束)射向连接分光镜的反射镜,另一道光束 B (测量光束)通过分光镜射入反射镜. 两道光束经过不同的光程分别被反射镜再反射回分光镜,汇聚叠加之后发生干涉并返回激光器,激光器内探测器监控两道光束间的干涉(图 1). 在进行直线轴

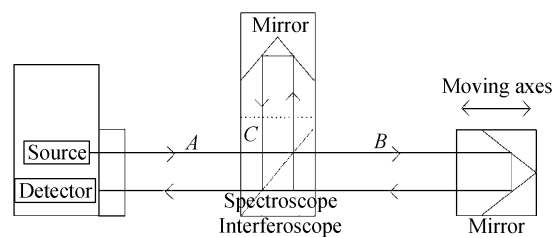


图 1 线性测量原理

Fig. 1 Principle of linearly measuring

运动准确度测量时,干涉镜保持固定不动,而反射镜则安装固定在并联机床的直线 X 或 Y 伺服轴上随其定时移动. 由于存在反射镜相对于干涉镜沿光轴的位移,这导致两条光束之间存在光程差^[3],从而得到直线轴的实际位移,通过与给定位移值比较,可获得直线轴的定位误差. 光程差 L 满足

$$L = N(\lambda/2mn) \quad (1)$$

式中 N 为激光器内光栅计数器记录的通过确定点的亮条纹数; λ 为激光在空气中的波长; m 、 n 分别为系统光路和电路的倍频数.

2 干涉测量的误差分析

干涉仪线性测量准确度除局部热源误差、死程误差外,因安装定位^[4]而引起测量准确度降低的因素主要有:准直误差和阿贝误差. 一般提高测量准确度的方案是设计补偿光路或对测试数据进行数学模型补偿^[5],后者由于其良好的灵活性和适应性正成为准确度补偿的主流.

2.1 准直误差

理论上线性测量时,入射激光束应与被测运动轴如数控直线运动轴准直. 但实际测量时,由于安装、定位等因素,入射激光束与数控直线运动轴总会有一定的偏差,从而存在一个夹角. 这就使测量所得距离和直线轴实际运动的真实距离有偏差(如图 2).

*教育部“高等学校博士学科点专项科研基金(20050700007)”和国际合作项目“复合柔性加工单元开发技术研究(2004KW-13)”资助
Tel: 029-82314668 Email: zhlx2001730@126.com
收稿日期: 2007-11-07

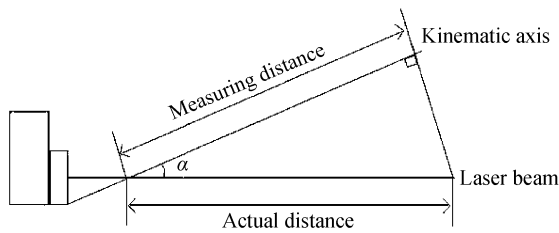


图 2 存在准直误差的原理
Fig. 2 Principle of collimation error

当激光束与运动轴未准直时,准直误差会使得测量的距离比实际距离要短.二者符合关系

$$\delta = L_1 - L_0 \quad (2)$$

$$L_0 = L_1 / \cos \alpha \quad (3)$$

通过对表 1 数据进行曲线拟合,可以获得干涉仪准直偏差角度与测量误差对应的特性曲线及其数学模型.

表 1 准直偏差角度与测量误差对应特性表

测量误差特性表						
准直角度偏差/(°)	1.5	3.4	4.9	10.9	15.4	35.4
测量误差/ppm	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0	50.0

但由于表 1 数据间距较大,采用多项式数学模型对其进行拟合所得曲线 A 准确度较低,平滑性不好,也不能估计原始数据外侧的值,致使曲线 A 所对应的准直误差数学模型精确性也较差.为此对表 1 数据进行三次样条插值,得到表 2. 由表 2 可知,当因安装、定位等因素使直线运动轴与测量激光束不准直,且使二者所存在的夹角 α 逐渐增大时,测量误差也逐渐显著增加.

表 2 插值后准直偏差角度与测量误差数据对应表

插值后的测量误差特性表									
准直角度偏差/(°)	1.50	1.50	...	15.4	20.0	25.0	30.0	35.0	35.4
测量误差/ppm	0.10	0.50	...	10.0	16.75	25.85	36.63	48.95	50.0

对表 2 数据进行曲线拟合作出干涉仪准直误差特性曲线 B(见图 3).

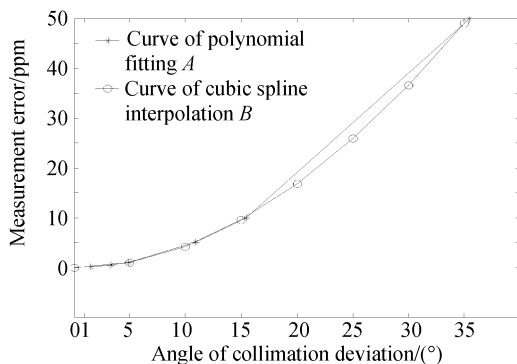


图 3 准直误差测量特性曲线
Fig. 3 Curve of collimation error

对曲线 B,采用最小二乘法拟合得出校正后激

光干涉仪的准直测量误差数学模型为

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (4)$$

式中 x 为准直偏差角度, $f(x)$ 为对应的测量误差, $a_0 = 0.00, a_1 = 0.00, a_2 = 5.00 \times 10^{-4}, a_3 = 3.69 \times 10^{-2}, a_4 = 2.92 \times 10^{-2}, a_5 = -8.21 \times 10^{-2}$. 即

$$f(x) = -8.21 \times 10^{-2}x^5 + 2.92 \times 10^{-2}x^4x^2 + 3.69 \times 10^{-2}x^3 + 5.00 \times 10^{-4}x^2 \quad (5)$$

根据式(5)可对激光干涉仪进行准直误差补偿,提高其线性测量准确度;也可以在干涉仪未进行准直误差补偿的情况下,对线性测量数据进行修正,从而真实反映被测对象的性能指标.尤其当准直偏差角度大于 $\pm 5^\circ$ 时,采用误差补偿可以获得更高的测量准确度.

2.2 阿贝误差

线性测量时,理论上要求激光测量光束与需校准轴线如所测直线运动轴轴线重合.实际上检测时反射镜是放置在与直线运动轴线平行的参考基准轴上(如一侧导轨上或工作台一侧),这样,测量光束轴线与直线运动轴线就必然存在一个偏移距离,即阿贝臂.由于机床导轨或轴线工作台在制造上存在直线度误差和平面度误差,这就造成干涉镜相对参考基准轴偏转或俯仰一个角度,进而造成测量光束光程的变化,从而影响测量准确度(如图 4).

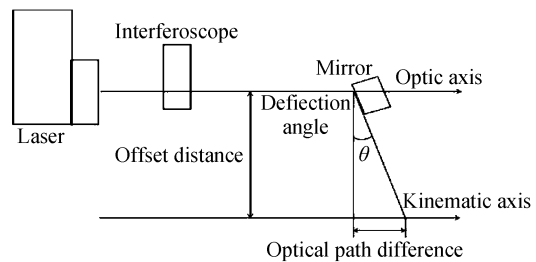


图 4 产生阿贝误差的原理
Fig. 4 Principle of Abbe error

据图 4 可知,阿贝误差符合关系式

$$z = f(x, y) = \delta_B = k\theta S \quad (6)$$

式中 δ_B 为阿贝误差; k 为比例系数; θ 为偏转角度; S 为阿贝臂长.

由式(6)知函数阿贝误差的图像是一个三维空间曲面,根据干涉仪的量程等应用范围将曲面定义在 $D = [x_0, x_m] \times [y_0, y_n] = [5, 500] \times [1, 120]$ 的区域上,并将 $[x_0, x_m]$ 在 x 方向上即阿贝臂长方向上取 5 mm、10 mm、50 mm、100 mm、500 mm 五个值,将 $[y_0, y_n]$ 在 y 方向上即偏转角度方向上取 1 s、2 s、5 s、10 s、20 s、60 s、120 s 七个值,测得不同阿贝臂长对应不同偏转角度所产生的阿贝误差值(见表 3).

表 3 阿贝误差数据表

偏转角度	阿贝误差/ μm				
	阿贝臂长/mm				
	/s	5	10	50	100	500
1	0.025	0.049	0.241	0.482	2.43
2	0.047	0.098	0.49	0.98	4.85
5	0.125	0.246	1.24	2.43	12.10
10	0.243	0.484	2.46	4.85	24.30
20	0.485	0.976	4.87	9.76	48.50
60	1.460	2.960	14.60	29.10	145.20
120	2.960	5.870	29.20	58.30	290.50

根据表 3 数据,利用 MATLAB 的 mesh 函数生成干涉仪阿贝误差特性曲面(见图 5).

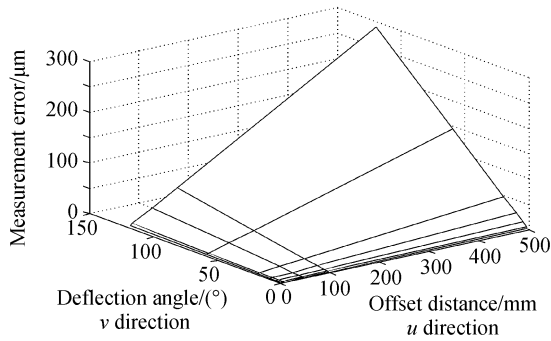


图 5 阿贝误差特性曲面

Fig. 5 Characteristic camber of Abbe error

理论上对图 5 的阿贝误差特性曲面进行拟合或可获得曲面方程,即阿贝误差的数学模型. 但此方法方程数量多且准确性低、准确度差. 因此,可采用离散曲面获得特性曲线进而得到曲线方程的方法求出阿贝误差的数学模型,如根据表 4,沿 u 、 v 方向分别对图 5 阿贝误差特性曲面进行离散,在 u 、 v 方向可各获得 5 条和 7 条特性曲线(见图 6(a)、图 6(b)).

表 4 部分测量数据及准确度统计表/ μm

目标点数	1	2	3	...	21			
位置/ μm	0.0000	20.0000	40.0000	...	400.00			
机床行驶方向	↓	↑	↓	↑	↓	↑	...	...
$j=1,2,3,4$	3.600	0	4.100	1.700	2.000	1.100	...	...
选定位置	-0.200	1.200	1.900	2.000	1.700	2.000	...	...
偏差值	3.300	1.000	2.200	1.100	1.400	0.800	...	...
X_j	...	...	...	...	...	...	...	...
单向均位偏差	2.233	0.733	2.733	1.600	1.700	1.300	...	...
标准不确定度 S_i	2.113	0.643	1.193	0.458	0.300	0.624	...	...
$2S_i$	4.225	1.286	2.386	0.917	0.600	1.249	...	...
平均 ↓ $2S_i$	-1.992	-0.552	0.347	0.683	1.100	0.051	...	...
平均 ↑ $2S_i$	6.459	2.019	5.119	2.517	2.300	2.549	...	...
$4S_i$	8.451	2.572	4.772	1.833	1.200	2.498	...	...
反向差值 B_i	-1.500	-1.133	-0.400	...	...	...	...	...
双向重复准确度 R_i	8.451	4.772	2.498	...	...	...	...	...
双向均位偏差	1.483	2.167	1.500	...	...	...	...	...

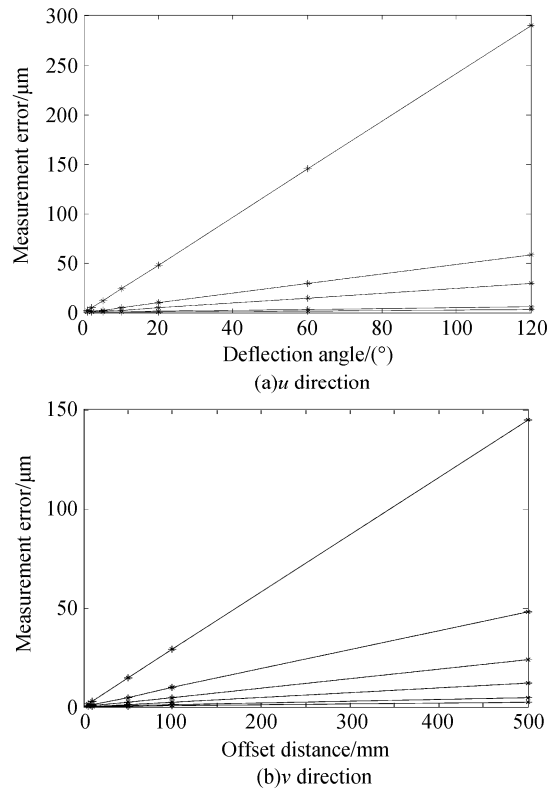


图 6 沿 u 、 v 方向离散的阿贝误差特性曲线

Fig. 6 A curve of Abbe error along u and v direction

利用最小二乘原理对曲线拟合即得 12 个阿贝误差特性方程. 沿 u 方向离散的阿贝误差特性曲线方程为

$$y_5 = -1.2 \times 10^{-3}x + 2.42 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$y_{10} = -4.0 \times 10^{-4}x + 4.83 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$y_{50} = -1.19 \times 10^{-2}x + 2.418 \quad (9)$$

$$y_{100} = -4.4 \times 10^{-3}x + 4.834 \quad (10)$$

$$y_{500} = -1.194 \times 10^{-1}x + 2.418 \quad (11)$$

沿 v 方向离散的阿贝误差特性曲线方程为

$$y_1 = 4.8 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$y_2 = 2.5 \times 10^{-3}x + 9.6 \times 10^{-3} \quad (13)$$

$$y_5 = 2.4 \times 10^{-2} \quad (14)$$

$$y_{10} = 4.8 \times 10^{-2} \quad (15)$$

$$y_{20} = 2.55 \times 10^{-2}x + 9.6 \times 10^{-2} \quad (16)$$

$$y_{60} = 2.9 \times 10^{-1} \quad (17)$$

$$y_{120} = 5.8 \times 10^{-1} \quad (18)$$

为提高阿贝误差数学模型的准确性,可对 u 、 v 方向即偏转角度和阿贝臂长方向进行插值;也可对其中部分特性曲线进行三次样条插值,然后再根据最小二乘原理对曲线拟合来获得高准确度的阿贝误差数学模型.

根据建立的准直误差数学模型和阿贝误差数学模型开发相应误差补偿软件,可使激光干涉仪的线性

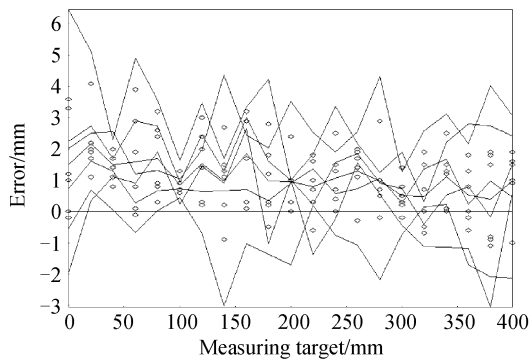
测量准确度达 ± 0.7 ppm,测量分辨率达 $0.001 \mu\text{m}$.

3 并联机床直线轴定位准确度检测

在对机床直线轴定位准确度进行测量时,根据准直测量误差数学模型和阿贝误差数学模型可实现对干涉仪的误差补偿,提高干涉仪的测量准确度;也可据此修正测得的机床定位准确度测量数据,准确反映机床的性能指标.结合实验室开发的某型并联机床,在检测其轴线准确度时,取直线轴的工作行程为测量区间,并联机床直线轴定位准确度、重复定位准确度的测量目标点按式(19)确定

$$L_i = Si + L_0 \quad (19)$$

式中 S 为测量间距,取为 20 mm , i 为所取测量目标点数, L_0 为消除反向间隙的越程,取为 20 mm . 由于环境所导致的空气折射率变化会引起较大的测量误差,因此须采用干涉仪附属的环境补偿装置来补偿激光束波长在气温、气压及相对湿度影响下的变化,以保证测量准确度.然后,编写机床运行程序,令机床直线轴工作台在每个测量目标点暂停 5 s ,当并联机床直线轴正向行使到第一个目标位置 L_1 处并暂停时,因干涉镜固定不动,参考光束光程始终不变,而测量光束的光程由于反射镜安装在机床伺服直线轴上,其光程已变.存在光程差的两束光反射回干涉镜汇合为一束干涉光,光电检波器检测返回激光器干涉光的干涉条纹,进而计算出光程长度,即



定位准确度重复定位准确度分析/ μm

均偏差范围 M	1.767	反向差值 B	2.633
系统偏差 E	3.400	定位准确度 $A \uparrow$	7.379
单向重复 $R \uparrow$	7.379	定位准确度 $A \downarrow$	9.519
单向重复 $R \downarrow$	8.451	定位准确度 A	9.519

图7 定位准确度、重复定位准确度分析曲线

Fig. 7 A curve of accuracy and repeatability accuracy

直线轴的实际移动距离.通过与直线轴理论移动距离的比较可得第一个测量目标位置的定位误差.根据 PMAC 程序,每 20 mm 一个测量目标点,正反向各测量 21 个数据为一组,共测 3 组数据.从而测出并联机床直线轴 X 轴的定位准确度和重复定位准确度.(见表 4,图 7).

4 结论

对雷尼绍激光干涉仪线性测量原理进行了详细探讨,分析了干涉仪线性测量中测量准确度的主要影响因素和误差源;做出了干涉仪的准直误差特性曲线,运用最小二乘法原理得出了干涉仪准直测量误差数学模型;做出了干涉仪的阿贝误差特性曲面,求出了沿 u 、 v 方向离散的 12 个阿贝误差特性曲线方程;给出了一种干涉仪准直误差和阿贝误差数学模型建模方法.然后采用干涉仪检测了并联机床直线轴的运动准确度,提出了一种适合于类似机床直线轴定位准确度、重复定位准确度检测的干涉测量方法.为下一步进行机床轴线误差补偿、提高并联机床直线轴运动准确度打下了理论基础.

参考文献

- [1] MASROOR I, GHAZANFAR H. Michelson interferometer for precision angle measurement[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(1): 113-120.
- [2] SUN Wen-ke, XU Jie, YIN Chun-yong, et al. The study of improving on measured precision of heterodyne fabry-parot interferometer[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(4): 288-291.
孙文科, 许婕, 殷纯永, 等. 提高差拍法布里-珀罗干涉仪测量准确度的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(4): 288-291.
- [3] SU Li-juan, YUAN Yan, XIANG-LI Bin, et al. Optical path difference analysis of ultra-rapid-scanning imaging interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1120-1123.
苏丽娟, 袁艳, 相里斌, 等. 高速转镜干涉成像光谱仪的光程差分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1120-1123.
- [4] LI Xia, YUAN Yan, ZHAO Jian-ke. Microstress installation and experiment result of the interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 918-921.
李霞, 袁艳, 赵建科. 干涉仪的微应力安装力学分析以及试验结果[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 918-921.
- [5] NGOI B K A, CHIN C S. Self-compensated heterodyne laser interferometer [J]. *International Journal Advanced Manufacture Technology*, 2000, **16**(3): 217-219.

Errors Analysis of Interferometry and Accuracy Measurement for NC Machine Tools

ZHANG Li-xin^{1,2}, HUANG Yu-mei¹, WANG Feng¹

(1 School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 School of Machinery and Electricity Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Received date: 2007-11-07

Abstract: The principle of linear measure of Renishaw laser interferometer was explored. Main factors and inducements of errors of the laser interferometer in measuring the precision of linear axis are analyzed. A curve of collimation error and a Abbe error camber in linear measure are devised, using least squares fitting method, the mathematical model of collimating measurement error for interferometer is established and Abbe error characteristic curvilinear equation along u and v orientation discretely is obtained. An error mathematic modeling method is presented. Precision of linear axis on Hybrid NC machine tools is measured by using a laser interferometer, in order to ready to compensate the errors of precision of movement on the hybrid NC machine tools. A interferometry method suited to measure location accuracy for linear axis of NC machine tool is proposed.

Key words: Laser interferometer; Error analysis; Hybrid NC machine tools; Interferometry



ZHANG Li-xin was born in 1967. Now he is an associate professor at Xi'an University of Technology and Shihezi University, and pursuing the Ph. D. degree. His research interests focus on CNC machine tool and CAD/CAM and detection.