

双频激光干涉测量中的环境补偿技术

池 峰¹ 朱 煜¹ 张志平² 高为宫²

(¹ 清华大学机械工程系, 北京 100084)
(² 上海微电子装备有限公司, 上海 201203)

摘要 作为一种超精密的非接触式测量设备,双频激光干涉测量系统可以在保证纳米级测量精度的情况下实现大范围和高速度测量,因而获得非常广泛的用途。环境是影响激光干涉测量系统测量精度的最大因素,为了获得纳米测量精度,必须对测量环境进行补偿。因此,重点研究了环境补偿技术,并研制了一种新型波长跟踪器,与 Edlen 经验公式进行对比测试,结果表明新型波长跟踪器具有良好的补偿效果。采用自制波长跟踪器补偿之后,被测运动台伺服精度可达 1.61 nm。

关键词 物理光学;精密测量;双频激光干涉仪;Edlen 经验公式;波长跟踪器;环境补偿;纳米测量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0408004

Environment Compensation Technologies in Dual-Frequency Laser Interferometer Measurement System

Chi Feng¹ Zhu Yu¹ Zhang Zhiping² Gao Weigong²

(¹ Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(² Shanghai Micro Electronics Equipment Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract As a super-precision and un-touched measuring system, dual-frequency laser interferometers with the advantages of high accuracy, large-scale and high measurement speed plays an important role in many fields. It is well known that environments such as temperature, air pressure and humidity play the most influence on measurement precision of dual-frequency laser interferometer. In order to improve precision, environments must be controlled and compensated. The environment compensation technologies are described and a novel wavelength tracker is developed. The test results contrasted with Edlen show that the novel wavelength tracker has good effects on environmental compensation. Moreover, the servo controlling precision of moving stage measured by dual-frequency interferometer compensated with the novel wavelength tracker is 1.61 nm.

Key words physical optics; precision measurement; dual-frequency laser interferometer; Edlen empirical formula; wavelength tracker; environments compensation; nanometer measurement

OCIS codes 230.7405; 230.3120; 060.3510; 140.3295

1 引 言

双频激光干涉仪以其特有的大测量范围、高分辨率和高精度等优点,在光刻机、精密机床加工、汽车制造、坐标测量等超精密测量领域得了广泛的应用^[1-7]。

目前,双频激光干涉测量系统干涉仪(IFM)的分辨率可达 0.31 nm 甚至 0.15 nm,但高分辨率并不代表高测量精度。影响系统测量精度的因素可以分为仪器误差、几何误差和环境误差等三类,其中环境误差是主要因素。环境误差补偿技术已经成为双频激

收稿日期: 2013-08-07; **收到修改稿日期**: 2013-10-15

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02201)

作者简介: 池 峰(1978—),男,博士研究生,主要从事超精密控制及超精密位置传感器等方面的研究。

E-mail: chif@smee.com.cn

导师简介: 朱 煜(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造与自动化、电子制造工艺及装备、超精密机械设计与制造、精密测量与运动控制等方面的研究。E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

光干涉仪测量技术的一个技术难点和热点^[8-11],目前常用的补偿技术有直接补偿法和 Edlen 补偿法。

为了对环境误差进行测量及补偿,本文在一套双频激光干涉测量系统的基础上,研制了一种全新的波长跟踪器(WT),利用该波长跟踪器和 Edlen 公式等两种方式对环境误差进行了测量与补偿,该波长跟踪器具有结构简单、制造成本低等特点。

2 双频干涉测量系统环境误差测量

2.1 实验设备及条件

双频激光干涉测量系统包括频差稳定的激光光

源(氦氖双频激光器)、精密的光学干涉模块(激光干涉仪、反光镜和分光镜等光学元件)、可靠的测量电路(激光接收器)和高速实时的信号处理电路(激光计数卡)等。图 1 所示为双频激光干涉测量系统的原理图。图 2 是开发的双频激光干涉测量系统,其主要构成如表 2 所示,该系统测量分辨率为 0.15 nm。图 3 是该系统的实物照片,除了机箱和计算机之外的其他设备均放在温控玻璃房内,以保持测量环境的相对稳定。根据表 1 可知,在时间相对较短的情况下,材料的热膨胀可以忽略,因此实验数据仅采集 5 min。

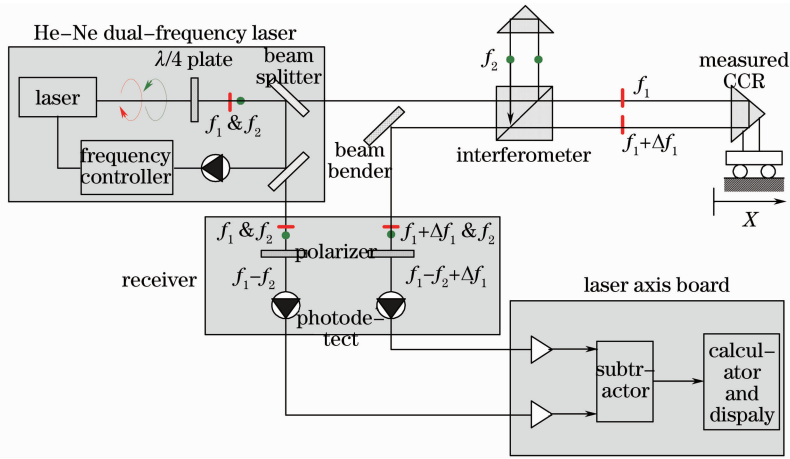


图 1 双频激光干涉测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dual frequency laser interferometer measurement system

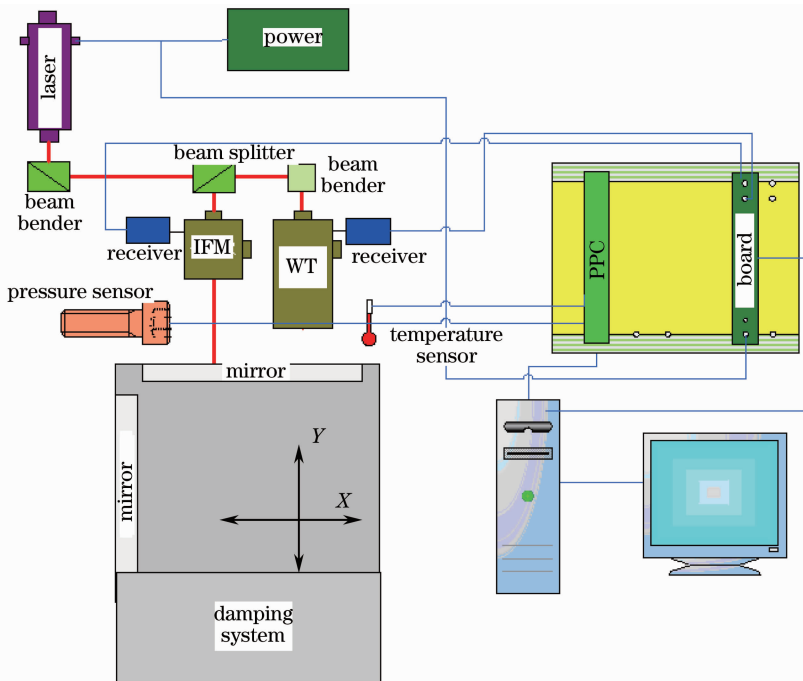


图 2 双频激光干涉测量系统

Fig. 2 Dual-frequency laser interferometer measurement system

表1 环境误差构成

Table 1 Environmental error components

Error components	Accuracy	Long-term repeatability	Short-term repeatability
Atmospheric compensation	✓	✓	✓
Optics thermal drift	✓	—	✓
Material thermal expansion	✓	—	✓

表2 双频激光干涉测量系统主要构成

Table 2 Structure dual-frequency interferometer measurement system

Items	Type	Quantity
Dual-frequency laser	5517D	1
Beam bender	Custom	2
50% beam splitter	Custom	1
One axis interferometer	Custom	1
Wavelength tracker	Custom	1
Receiver	Custom	2
Board	Custom	1
Temperature sensor	5610	1
Pressure sensor	RPT350	1
Damping system	Stacis 2000	1
Moving stage	Custom	1

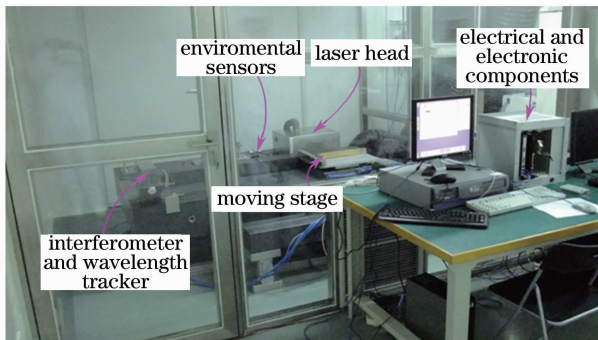


图3 双频激光干涉测量系统实物

Fig. 3 Real dual-frequency laser interferometer measurement system

2.2 环境误差测量实验

在图3所示的测量系统中,将安装了反射镜的运动台运动一定位移,使得反射镜距离干涉仪出光面为200 mm,然后用真空将运动台吸附在大理石上,此时运动台和干涉仪之间的相对几何位置固定不动。利用一个铝制的罩壳,将干涉仪和反射镜之间的空气封闭起来,使测量光程不受外界环境影响,再利用干涉测量系统测量干涉仪和反射镜之间的位置变化,每4 s采样一次,采样5 min,结果如图4所示。此时干涉仪和反射镜之间的位置变化非常小,3 σ 仅为1.67 nm,此误差可认为是干涉仪的仪器误差。

然后在其他条件不变的情况下,将铝制罩壳去掉,此时大气环境的变化将会对测量结果产生影响,

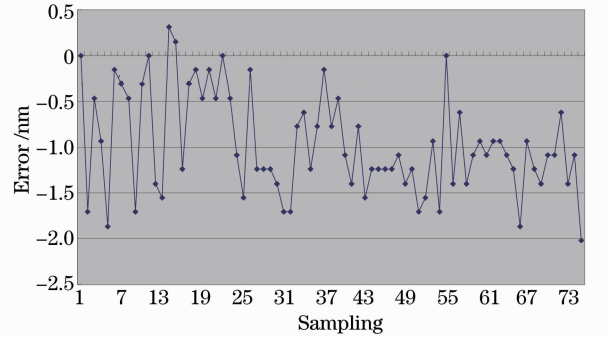


图4 测量光路密闭条件下的测量结果

Fig. 4 Measuring result under airtight condition

如图5所示,测量误差明显变大,3 σ 为21.4 nm。

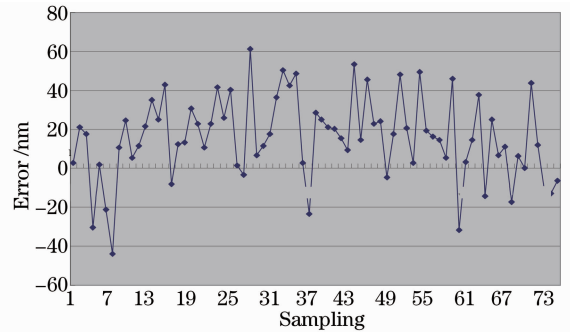


图5 干涉测量系统的大气误差(光程200 mm)

Fig. 5 Error due to atmospheric of 200 mm light travel range

干涉测量系统的大气误差不仅和大气环境的变化程度有关,还与光程长度密切相关,近似为线性关系,图6是光程为1000 mm时的测试数据,此时大气误差的3 σ 为114.5 nm。

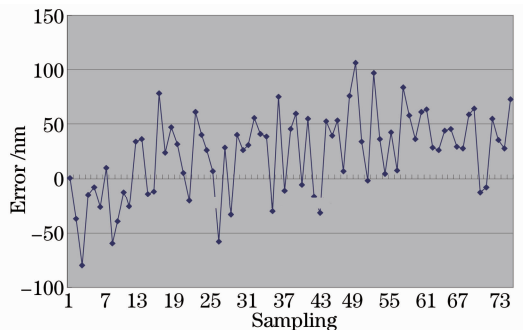


图6 干涉测量系统的大气误差(光程1000 mm)

Fig. 6 Error due to atmospheric of 1000 mm light travel range

3 环境误差补偿技术与实验

3.1 环境误差补偿技术

3.1.1 直接测量法

直接测量法是指利用波长跟踪器测量空气中的波长,然后对干涉仪测量结果进行补偿。图 7 是传

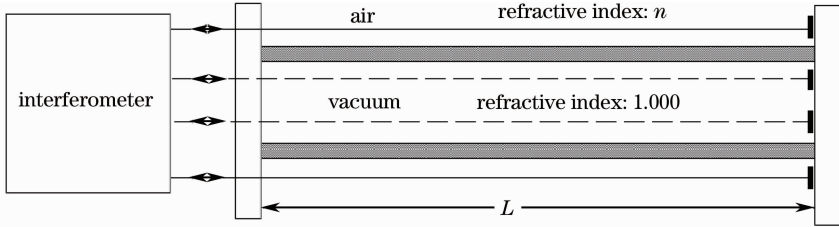


图 7 传统的波长跟踪器示意图

Fig. 7 Conventional wavelength tracker

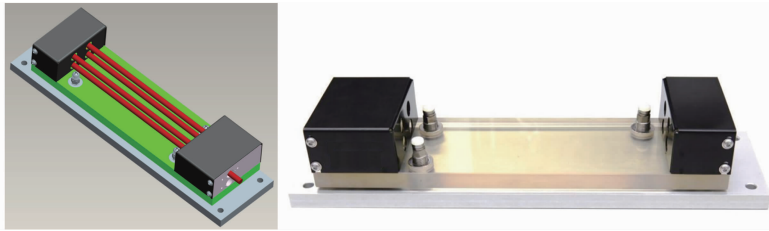


图 8 波长跟踪器

Fig. 8 Wavelength tracker

开发的波长跟踪器实际上也是一种干涉仪,干涉仪和被测反射镜固定在零膨胀底板上,利用零膨胀底板长度不随环境变化的特性,它也能提供一个“标准腔长”(长度 200 mm),该腔长的几何长度不随环境变化而变化,因此通过波长跟踪器测量出来的光程变化可认为是环境折射率变化导致的,由此可算出环境的波长变化,然后对位移测量进行补偿。具体的计算方法如下。初始时刻,标准腔的长度可用波长表示为

$$L_0 = N \cdot \frac{\lambda_0}{M}, \quad (1)$$

式中 L_0 为标准腔的初始长度, λ_0 为初始时刻的波长, M 为干涉测量系统的细分数, N 为波长个数。当波长发生变化时,标准腔的长度可表示为

$$L_1 = N \cdot \frac{\lambda_1}{M}. \quad (2)$$

两个时刻的标准腔的长度之差即为干涉仪所测量的数值

$$\Delta L = \frac{N}{M}(\lambda_1 - \lambda_0) = \frac{N}{M}\Delta\lambda, \quad (3)$$

式中 N 可用标准腔长的名义值表示:

$$N = \frac{M \cdot L}{\lambda}, \quad (4)$$

式中 L 为标准腔长的名义值, λ 为波长的名义值。因

统的波长跟踪器示意图,它由一个干涉仪和一个标准腔构成,标准腔需要抽成真空,这种波长跟踪器对制造工艺要求很高,其测量精度取决于标准腔的真空度。图 8 是开发的一种全新的波长跟踪器。

此可得波长变化值为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{L}\Delta L. \quad (5)$$

3.1.2 Edlen 公式法

为了验证开发的波长跟踪器实际效果,需要和 Edlen 公式法进行比对测量。Edlen 公式法是一种经验公式,是在干涉光路中布置高灵敏度的温度、压力和相对湿度传感器,对空气的温度、压力和相对湿度等参数进行测量,然后代入 Edlen 公式求出空气折射率。Edlen 公式的微分形式如下^[12]:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial n}{\partial p}\Delta p + \frac{\partial n}{\partial f}\Delta f, \quad (6)$$

式中 P 为大气压力(Pa), T 为环境温度(K), f 空气中水蒸气压力(Pa)。在 $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 101325\text{ Pa}$, $f = 1333.22\text{ Pa}$ 的时候, $\frac{\partial n}{\partial t} = -0.929 \times 10^{-6}$, $\frac{\partial n}{\partial p} = 0.00269 \times 10^{-6}$, $\frac{\partial n}{\partial f} = -0.00042 \times 10^{-6}$ 。

空气温度、压力和相对湿度均有影响,但温度影响最明显,其次是压力,湿度影响最小,几乎可以忽略,所以仅需补偿温度和压力。

3.2 环境误差补偿比对实验

3.2.1 实验条件

采用图 3 所示的测试平台,将自制波长跟踪器

与干涉仪并排放置,并且在光路附近放置温度传感器和压力传感器。波长跟踪器、干涉仪、温度传感器以及压力传感器的采样间隔为 1 s,连续采样 5 min。实验进行了两组:第一组的干涉仪光程为 200 mm;第二组的干涉仪光程为 1000 mm。

3.2.2 实验结果

1) 干涉仪光程为 200 mm 时补偿效果

波长跟踪器光程长度和干涉仪光程长度均为 200 mm,测量结果如图 9 所示。通过波长跟踪器补偿之后,干涉仪测量误差的 3σ 由 24.4 nm 下降到 6.9 nm,补偿效果比较明显。补偿的残差主要是干涉仪的仪器误差、环境不均匀性以及振动等因素导致的误差。

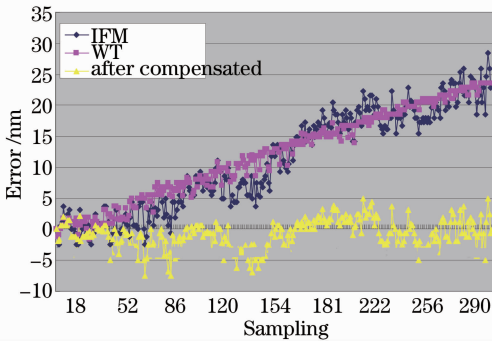


图 9 利用波长跟踪器对干涉仪的环境误差进行补偿 (光程 200 mm)

Fig. 9 Compensation of wavelength tracker of 200 mm light travel range

图 10 是干涉仪光程为 200 mm 的情况下,通过 Edlen 公式进行补偿的结果。通过补偿,干涉仪的测量值 3σ 由 24.4 nm 下降为 7.5 nm。图 11 是实时采集的温度和压力数据。

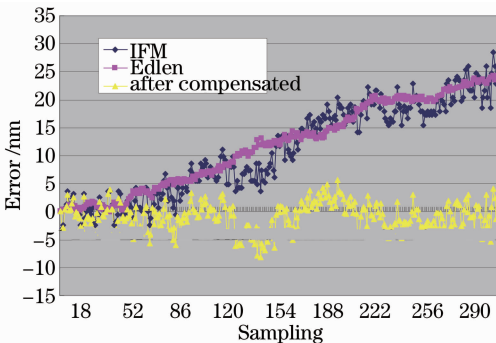


图 10 利用 Edlen 公式对干涉仪的环境误差进行补偿 (光程 200 mm)

Fig. 10 Compensation of Edlen of 200 mm light travel range

2) 干涉仪光程为 1000 mm 的补偿效果

将干涉仪的测量光程由 200 mm 加长到

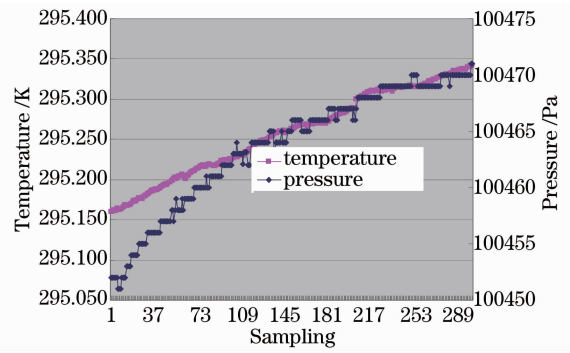


图 11 温度压力数据(光程 200 mm)

1000 mm,而波长跟踪器的光程仍然为 200 mm,二者的测量结果以及补偿结果如图 12 所示。由于波长跟踪器和干涉仪的光程不相同,因此补偿时不能直接相减,补偿公式为

$$s = V_1 - V_{WT} \times \frac{1000}{200}, \quad (7)$$

式中 s 为补偿后的残差, V_1 为干涉仪测量值, V_{WT} 为波长跟踪器测量值。补偿之前干涉仪测量值的 3σ 为 109.7 nm,补偿之后的残差 3σ 为 25.8 nm,下降为原来的 1/4 左右,补偿效果非常明显。

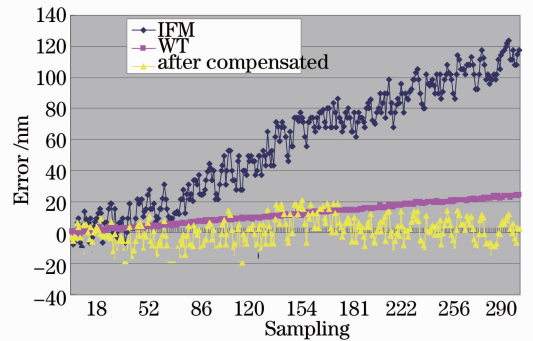


图 12 利用波长跟踪器对干涉仪的环境误差进行补偿 (光程 1000 mm)

Fig. 12 Compensation of wavelength tracker of 1000 mm light travel range

图 13 是干涉仪光程为 1000 mm 的条件下,通过 Edlen 公式进行补偿的数据,干涉仪测量误差的 3σ 由 109.7 nm 下降为 28.6 nm。两者基本一致,都达到了较好的补偿效果。温度和压力的原始数据如图 14 所示。

4 应用

目前,该波长跟踪器已经应用于国家 02 重大专项“90 nm 光刻机 α 样机研发”项目,并且经过实际测试,在 90 nm 高端扫描光刻机中,为干涉仪测量提供了良好的环境补偿功能,达到既定目标。图 16

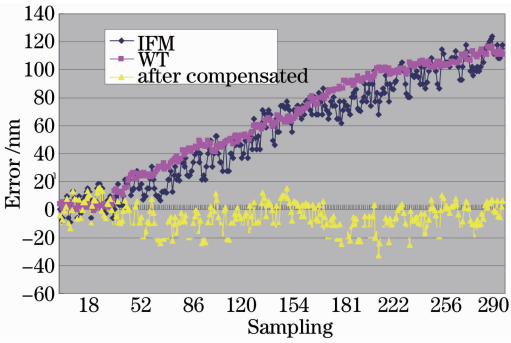


图 13 利用 Edlen 公式对干涉仪的环境误差进行补偿 (光程 1000 mm)

Fig. 13 Compensation of Edlen of 1000 mm light travel range

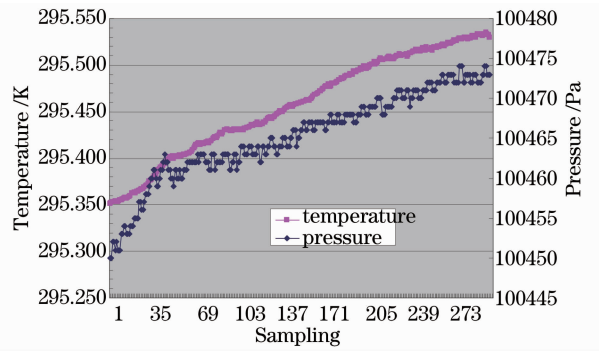


图 14 温度压力数据(光程 1000 mm)

Fig. 14 Temperature and pressure (optical path is 1000 mm)
光刻机工件台掩模台同步控制精度, 移动平均精度 $M_A = 1.61 \text{ nm}$, 移动标准偏差 $M_{SD} = 6.84 \text{ nm}$, 应用效果非常明显。

是在波长跟踪器补偿模式, 干涉仪控制下的 90 nm

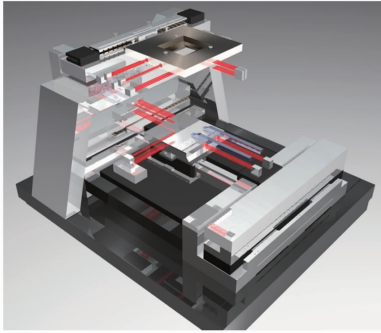


图 15 干涉仪波长跟踪器在 90 nm 光刻机中的应用

Fig. 15 Application in 90 nm lithography

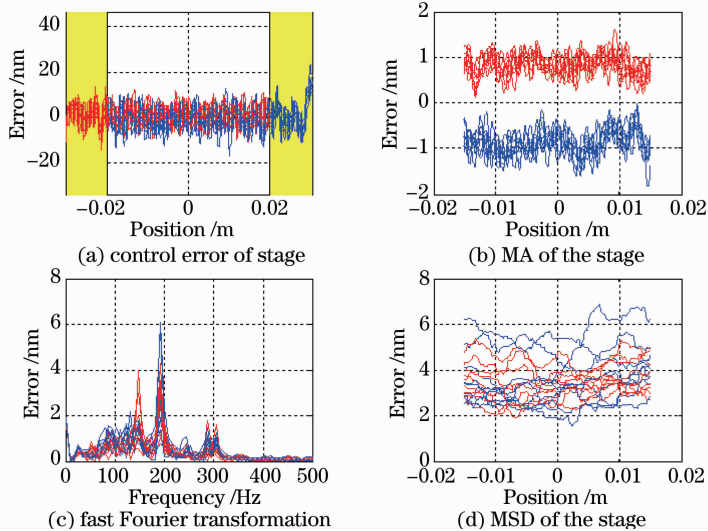


图 16 干涉仪控制下工件台掩模台扫描精度 ($v = 1.4 \text{ m/s}$)

Fig. 16 Control accuracy of stage under interferometer ($v = 1.4 \text{ m/s}$)

5 结 论

概述了双频激光干涉测量原理以及环境变化对测量精度的影响, 重点阐述了双频激光干涉测量的

环境补偿技术。开发了一套双频激光干涉测量及环境补偿系统, 研制了一种全新的波长跟踪器, 替代传统抽真空的波长跟踪器, 并利用 Edlen 经验法对该

波长跟踪器进行了补偿比对测试。主要结论如下：

1) 在 1000 级净化间, 5 min 内, 200 mm 光程内的环境误差 3σ 值为 21.4 nm, 而光程为 1000 mm 时, 环境误差 3σ 值为 114.5 nm, 环境误差和光程近似成线性关系;

2) 在 200 mm 和 1000 mm 测量光程下, 通过对自行研发的波长跟踪器和 Edlen 公式两种补偿方法可知, 两种补偿效果接近, 证明自行研制的波长跟踪器效果可信, 可将环境误差补偿掉 $3/4$ 左右, 残余误差仅为 $1/4$;

3) 目前该自制波长跟踪器已成功应用于 90 nm 光刻机中。通过自制的波长跟踪器补偿, 在双频干涉仪测量下, 运动台伺服精度 M_A 可达 1.61 nm。

参 考 文 献

- 1 Chen Benyong, Mu Ruizhen, Zhou Yanjiang, *et al.*. Nonlinear error analysis of laser synthetic-wavelength nano measurement interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 240-244.
陈本永, 穆瑞珍, 周砚江, 等. 激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 240-244.
- 2 Peter L M Heydemann. Determination and correction of quadrate fringe measurement error in interferometers[J]. Appl Opt, 1981, 20(19): 3382-3384.
- 3 Zeng Danhua, Xiao Tiqiao, Xi Zaijun, *et al.*. Detector nonlinear error and compensation in phase-stepping interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1358-1362.
曾丹华, 肖体乔, 席再军, 等. 移相干涉仪中探测器非线性误差及其补偿[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1358-1362.
- 4 Li Zhi, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. Investigation of

neural network modeling for instantaneous phase in single-frequency interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 121-124.

李 直, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. 单频干涉仪瞬时相位计算的神经网络模型[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 121-124.

- 5 Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yubin, *et al.*. Influence of metal-coated mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipso metry[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 439-443.
邓元龙, 李岳峙, 吴玉斌, 等. 金属反射镜对外差干涉椭圆测量精度的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 439-443.
- 6 Yang, Kuo T C. A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem[J]. Eur J Operational Research, 2003, 147(1): 128-136.
- 7 B Edlen. The refractive index of air[J]. Metrology, 1996, 2(2): 71-80.
- 8 Yasuhide Takahashi, Mataichiro Kiso, Hicoshi Teramoto, *et al.*. Optical interferometry for nanometer measurement of a large step[J]. Int J Jpn Soc Prec Eng, 1993, 59(5): 755-760.
- 9 Mike Holmes, Robert Hochen, David Trumper. The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy [J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 191-209.
- 10 Wei Gao, Robert J Hochen, John A Patten, *et al.*. Construction and testing of a nanomachining instrument [J]. Precision Engineering, 2000, 24(4): 320-328.
- 11 C M Wu, C S Su, G S Peng, *et al.*. Polarimetric, nonlinearity-free, homodyne interferometer for vibration measurement [J]. Metrologia, 1996, 33(6): 533-537.
- 12 Qi Yongyue, Zhao Meirong, Li Yuchi. Review on nano-measuring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 91-94.
齐永岳, 赵美蓉, 林玉池. 纳米测量系统的研究现状与展望[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 91-94.

栏目编辑:何卓铭