

文章编号 1004-924X(2018)07-1570-08

线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置

金涛¹, 刘景林^{1*}, 杨卫², 乐燕芬¹, 侯文玫¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 普爱纳米位移技术(上海)有限公司, 上海 201203)

摘要: 直线度测量中往往存在有限的测量范围、精度低和阿贝误差等问题。本文提出了一种高精密直线度外差干涉测量装置, 该装置由 Koester 棱镜、角锥棱镜、1/4 波片、楔面棱镜和楔面反射镜构成。楔面棱镜为直线度传感元件, 角隅棱镜和楔面反射镜是测量信号的回光元件。双频激光信号进入直线度干涉仪后组成几何空间对称四光路测量信号。四路测量光走过几乎完全相同的路径有效地提高了干涉仪的稳定性, 并且使空程误差最小化。使用楔角为 1° 的楔角棱镜和 $2\pi/512$ 细分的相位计, 直线度测量分辨力为 17.71 nm。该方法不需要与行程同长的大反射参考镜, 但同样能实现高分辨率, 理论和实验证明空间对称测量结构避免了由俯仰, 偏转和滚转角引起的阿贝误差的串扰, 而且光学元件少, 结构简单, 方便易用, 结果可以直接溯源到米的定义。

关键词: 测试计量技术及仪器; 直线度测量; 外差激光干涉; 阿贝误差

中图分类号: TN247; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1570

High-precision straightness interferometer for linear moving stage

JIN Tao¹, LIU Jing-lin^{1*}, YANG Wei², LE Yan-fen¹, HOU Wen-mei¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Physik Instrumente (PI Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

* Corresponding author, E-mail: 64455968@qq.com

Abstract: An interferometer is proposed for high precision straightness measurement. This instrument consists of a Koester prism, corner cube, quarter-wave plate, wedge prism, and wedge reflector. The wedge prism acts as the straightness sensor while the corner cube and wedge reflector are used to reflect the measurement signal. During operation, the two frequency interferometer signal is decomposed into four beams with a spacially symmetrical measurement structure. The beams have common paths, which result in an improved stability of the interferometer and the minimization of dead path. A measurement resolution of 17.71 nm was determined with a phasemeter which has a resolution of $2\pi/512$ and a wedge prism with one wedge angle. The setup does not require a mirror, which typically has a size that is comparable to that of the stroke of a linear moving stage. However, it can be used to measure straightness with very high resolution. The theoretical and experimental results demonstrate that the crosstalk of the Abbe error caused by pitch, yaw, and roll angle is avoided due to the spacially symmetrical measurement structure. The proposed interferometer has

收稿日期: 2018-03-06; 修订日期: 2018-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075280, No. 51705324); 上海市自然科学基金资助项目 (No. 16ZR1423000); 国家自然科学基金中德合作研究中心项目 (No. GZ1287)

several advantages such as fewer optical components, a simple structure, ease of use, and repeatability of measurement results.

Key words: measurement technology and instrument; straightness measurement; heterodyne laser interferometry; Abbe error

1 引言

现代高性能精密数控机床和三坐标测量机中的位移控制精度一般都小于 100 nm,而在光栅刻划工作台、光刻机的扫描定位工作台和大范围扫描探针显微镜等精密定位装置中,测量精度要求在 1 nm 以下。随着位移精度要求的不断升级,位移运动过程中的各种偏移及偏转必须进行精密测量和严格控制。其中,直线度(横向和纵向的直线偏移)是最基本的测量项目,它是平面度、平行度、垂直度、同轴度等几何量测量的基础。同时在实际的定位装置中,并不是所有高性能精密运动的测量都符合阿贝原则,从目前已报道的文献资料来看,直线度测量结果或多或少仍包含阿贝误差。一些学者通过修正阿贝误差来提高直线度测量精度^[1-5],但是测量系统较为复杂,不方便使用。随着工业的发展,精密定位系统的行程也逐渐增加,研究一种测量精度高,不受阿贝误差串扰,同时又可测量大行程的直线度测量方法显得十分迫切。

直线度测量方法种类繁多,目前主要分为两类,一类是以激光光束中心线作为直线基准的激光准直法,另一类是采用干涉原理实现直线度测量的干涉法。激光准直法通常用位敏探测器(PSD)或四象限(PD)作为光电接收靶,通过测量激光光束中心相对于光电接收靶中心的偏移实现直线度测量^[6-7]。该方法实现成本低、结构紧凑、光学易于调整,并且可以同时测量横向和纵向的直线偏移,但是不容易实现高精密测量。实际工业生产中,常常通过测量角度偏差来计算直线度误差,主要有两种方法:一是通过测滚转角来得到直线度,分辨力很高,但需要一面与位移行程同样长的平面镜,平面镜的质量严重影响测量结果,这是该方法的一个主要误差,而且这种方法很难准确剔除阿贝误差(角度值换算为长度时,臂长的取值不易确定);另外一种更常用,它不采用长的平面镜,直接在平行位移方向,即位移台顶端测量俯

仰角和偏转角^[8-9],不过这种方法更加难以准确剔除阿贝误差。上述两种方法都需要同时测量记录位移再进行计算,是间接测量,增加了测量误差的因素。同时,一旦有纯平移引起的直线度误差则无法进行测量。

近年来,人们逐步发展了基于干涉原理的直线度测量方法。激光干涉法通过检测直线度误差引起的相位变化从而得到被测对象的直线度信息^[10-13]。一直以来,被研究得最多的方法是以 Wollaston(沃拉斯顿)棱镜作为直线度传感器的外差干涉法,Wollaston 棱镜可将一束含有两个不同频率分量且振动方向相互垂直的激光以一定的夹角分开出射,分开的两束光经由平面镜组成的反射器反射后,可沿入射光原路返回并在 Wollaston 棱镜处形成干涉信号,若 Wollaston 棱镜在移动过程中存在位移偏移,则可通过干涉信号的相位变化计算直线度误差^[14]。基于 Wollaston 棱镜的直线度干涉仪实质上是以两条反射光束的角平分线作为直线基准的,测量精度和量程受限于两条反射光束之间的夹角,而且反射光原路返回激光谐振腔内影响激光器的稳定性。在此基础上学者们提出改进的方案,提高了测量行程和干涉仪的稳定性,测量分辨力和稳定性分别达到 0.019 μm 和 0.08 μm ^[15-16]。Zygo 公司发明了一种共光程干涉仪:差分平面镜干涉仪(Differential Plane Mirror Interferometer, DPMI),该仪器提高了外差干涉仪的稳定性。Zygo 和 Carl Zeiss 在 DPMI 的基础上均研发了直线度测量系统和模块^[17-18],但是它们存在光路调整困难和光路不对称/不共光路等问题。实验表明,在静态状态下 DPMI 的位移漂移小于 1 nm,而同等条件下传统迈克耳逊干涉仪漂移大于 10 nm^[19]。

鉴于差分平面镜干涉系统具有稳定性和测量精度高的优点,本文提出一种无阿贝误差串扰、结构紧凑、光路对称、分辨力高的双频直线度测量干涉仪。它不需要与轴向运动平行的平面镜,而且能实现大行程线性移动台的直线度测量。

2 直线度高精密测量干涉装置

2.1 直线度干涉测量原理

双频外差干涉仪指进入干涉仪的是具有一定频率差的两束不同频率的激光(f_1 和 f_2), 其中一个为水平偏振, 另一个为垂直偏振。它们各自走过干涉仪的一个干涉臂, 从而携带有不同的光学相位信息。当两束激光再度会合时, 形成拍频干涉测量光信号, 令它与参考信号($f_1 - f_2$) 进行相位比较, 则可得到相位差 $\Delta\varphi$ 和被测位移长度, 即光程差 Δl 的线性关系为:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中 λ 是激光的中心波长。假设 f_1 和 f_2 分别走过长度为 L_1, L_2 两干涉臂的长度, 引起的相位变化分辨为 φ_1 和 φ_2 , 则有:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| \\ \varphi_1 = 2\pi L_1 / \lambda \\ \varphi_2 = 2\pi L_2 / \lambda \end{cases} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可以看出, 只需要直线度误差能引起光程的变化, 通过相位计就可以很容易测量出直线度误差, 而且测量结果可溯源, 因此如何将直线度引入光程变化中就显得十分重要。综合现有直线度测量的优缺点和课题组已有的工作基础, 本文提出了一种新的直线度测量方法, 其基本测量原理如图 1 所示。

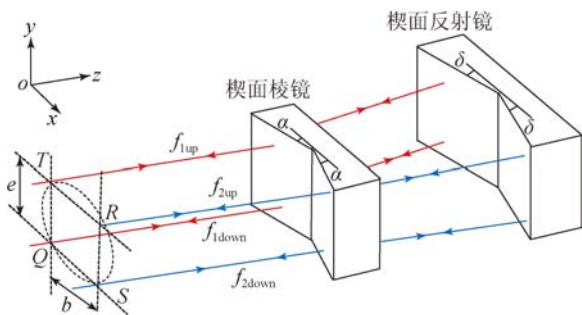


图 1 线性位移台直线度高精密测量原理

Fig. 1 Principle for high-precision measurement of linearity of linear displacement table

图 1 中楔面棱镜是直线度传感元件, 被固定在被测对象上; 楔面反射镜是回光器件, 被固定在基座上。如图 1 所示, 间距为 b , 频率为 f_1 和 f_2

的两束线偏振光沿 z 向从图 1 中的 T 和 R 两点入射, 穿过楔面棱镜后被楔面反射镜沿原路反射回至入射点。这两束反射光分别向下平移至 Q 和 S 点(向上移动亦可, 原理相同)作为入射光再次穿过楔面棱镜并被楔面反射沿原路返回, 至此 f_1 和 f_2 两束光共穿过楔面棱镜 4 次, 形成一个长为 b , 宽为 e 的空间对称光路。

假设楔面棱镜垂直于运动方向(z 轴)发生了横向偏移(x 轴)。实际的光路位置并未发生变化, 但是由于折射率不同, 光在楔角棱镜中的光程发生了变化。由于光是可逆的, 为了便于说明, 本文通过光线移动说明直线度的测量原理。

图 2(a) 表示沿光轴方向 4 条光路在楔面棱镜上面的投影。实线框表示楔面棱镜发生直线偏移前的位置, 虚线表示楔面棱镜发生位移为 d 的直线偏移后的位置, 如果光束同棱镜一起移动, 则它们的位置应从 T, R, Q, S 移至 T', R', Q', S' 。从 y 轴看过去, 如图 2(b) 所示, 即原光束应移至 f'_1 和 f'_2 的位置。但实际上光束并未移动, 故可以看做光束 f_1 向内偏移, 即经过的玻璃路程减少, 也就是光程减少; 光束 f_2 向外偏移, 即经过的玻璃路程增加, 也就是光程增加。由于 4 个光路中心对称, 它们的偏移几何距离的绝对值是相等的, 因此相应的光程差绝对值也是相等的。

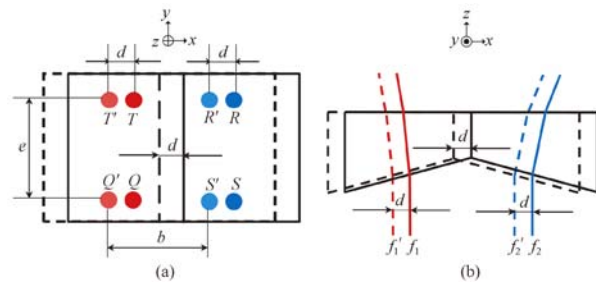


图 2 直线偏移引起直线度传感器中光路的变化

Fig. 2 Change of light path in straightness sensor caused by straight line migration

假设光束通过楔角棱镜路程的变化量为 l , α 为楔角棱镜的楔角, 则有:

$$l = d \sin \alpha \quad (3)$$

式中 l 与光程 Δl 直接相关, 因为每个频率的光束先后 4 次穿过楔角棱镜, 两个频率的光程变化一个为正值而另一个为负值, 所以总光程差 Δl 与 l

的关系为:

$$\Delta l = 8l(n_{\text{gla}} - n_{\text{air}}), \quad (4)$$

式中: n_{gla} , n_{air} 分别表示玻璃和空气的折射率。设玻璃折射率为 1.516 30(论文近似取 1.5), 空气折射率为 1.000 27(论文近似取为 1), 则有:

$$\Delta l = 4l = 4d \sin \alpha. \quad (5)$$

联立式(1)可得:

$$d = \frac{\lambda}{8\pi \sin \alpha} \Delta \varphi. \quad (6)$$

式(6)建立直线度与相位差之间的关系, 因为通过相位计记得测量于参考信号之间的相位差即可求出直线度误差。论文所用楔面棱镜的楔角 α 为 1° , 相位计的分辨力为 $2\pi/512$, 激光中心波长为 633 nm, 则根据式(6), 直线度的测量分辨力为 17.71 nm。

2.2 系统环境误差分析

空气温度、湿度、气压以及 CO_2 含量等因素对空气折射率都有影响, 当环境中这些因素改变时, 空气折射率会发生变化, 测量结果将不再准确。针对本测量系统, 由于其四光束是呈对角线对称分布的, 死程误差能够尽可能的减小。在测量过程中, 环境因素的变化对四束光的影响可认为是近似相同的, 两个频率的光在测量过程中受环境因素的影响可认为相互抵消。根据文献[17]中的测试结果, 该系统的测量信号在接近一个小时的时间(3 000 s)抖动为大约 1 count, 换算为直线度为 17.71 nm。但是该误差属于随机误差, 可以通过信号处理的方式优化, 拟合效果如图 3 所示。同时由于干涉臂中存在频率混叠, 外差干涉仪存在非线性误差[20], 但幅值一般为几个纳米, 不影响分辨力。

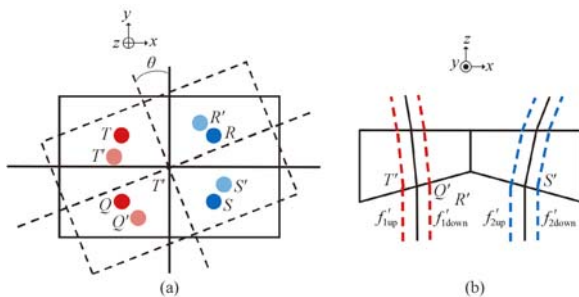


图 3 滚转角引起的直线度传感器中光路的变化

Fig. 3 Change of light path in straightness sensor caused by roll angle

2.3 余弦误差分析

当激光测量光轴与被检设备的运动轴不重合时, 产生的余弦误差使得测量距离比实际距离要短, 而本装置的余弦误差主要指楔形棱镜安装时产生的余弦误差。假设棱镜的实际位移量为 L , β 为理论位移路径与实际位移路径的夹角, 则所测得的位移量 L' 与 L 的关系为:

$$L' = L \cos \beta. \quad (7)$$

该误差为系统误差, 可消除, 不影响测量分辨力。

2.4 阿贝误差分析

直线度测量过程中往往存在由角分量(即俯仰、偏摆和滚转角)引起的阿贝误差[21]。本文所提的空间对称结构有效地避免了角分量引起的误差, 下面对每个角分量误差进行分析。

首先分析最难测量的滚转角引起的误差, 与图 2 一致, 仍然用光路的旋转代替 Koester 棱镜的旋转。从图 3(a)可以看出, 当棱镜发生旋转时, 例如从虚线位置旋转了 θ 角度至实线位置, f_1 光的上半部分光路(f_{1up})向内旋转, 下半部分光路(f_{1down})向外旋转。显而易见, 如图 3(b)所示, f_1 光向内旋转和向外旋转引起的光程变化相同, 相互抵消; 同理, f_2 光的光程变化也相互抵消。因此旋转角不会引起直线度测量误差。

其次, 俯仰角引起的误差实际与滚转角相同。假设光线垂直于棱镜的横截面入射, 如图 4(a)所示, 则沿 x 轴其出射光与入射光在同一水平线。如图 4(b)所示, 当棱镜绕 x 轴旋转了 γ 角, 即俯仰角度为 γ 时, 通过简单的几何演算可以得出棱镜上半部分出射光将向上移动的距离与棱镜下半部分出射光向下移动的距离相同(图 4(b)中的虚线表示出射光)。因此, 与滚转角一样, 不会引起直线度测量误差。

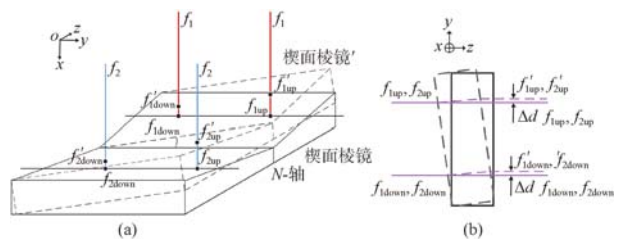


图 4 俯仰角引起的直线度传感器中光路的变化

Fig. 4 Change of light path in straightness sensor caused by pitching angle

最后分析情况较为复杂的偏摆角引起的误差。当直线度传感元件(楔角棱镜)沿 y 轴旋转运动时,即楔角棱镜有偏摆发生时,由于两个频率的光位于中轴的两边,偏摆使得两个频率的光的光程差有变化。但是在精密位移仪器中,一般偏摆角都很小,大约在微弧度级别,由偏摆引起光束在楔角棱镜上的位移很小,而且当偏摆角产生时,入射到楔角棱镜上的入射角及出射的折射角等都会产生很小的变化,不利于分析。如图 5(a)所示,粗实线为原始光束在楔角棱镜上光点的连线,粗虚线为发生角度为 φ 的偏转角时的光点连线,由于 φ 很小,可以近似认为光线还是原路返回。那么当发生偏摆时,由图 5(b)可知,两频率的光在 z 轴上并不是以同一坐标入射到楔角棱镜(WP)上,其相对位置的变化量为 $D = b \tan \varphi$ 。图 5(b)分析了当 z 轴上的位置发生了位移为 D 的变化时系统光程差的变化,由图可知光程差的变化为 $\Delta l = D(1 - \cos \psi) = b \tan \varphi (1 - \cos \psi)$,其中 ψ 为光从楔角棱镜出射时的折射角,楔角棱镜的楔角 $\alpha = 1^\circ$,材料为 K9,所以 $\psi = 0.51^\circ$ 。以 PI 公司的 M-403.42S 为例,其偏摆角为 $\varphi = 400 \mu\text{rad}$,Koester 棱镜出射光的间距 $b = 9 \text{ mm}$,得出 $\Delta l = 0.143 \text{ nm}$,总的光程差为 $\Delta L = 8\Delta l = 1.144 \text{ nm}$,与所能测得的最小直线度 $d = 17.71 \text{ nm}$ 相比,可以忽略不计,因此偏摆角不会引起直线度测量误差。

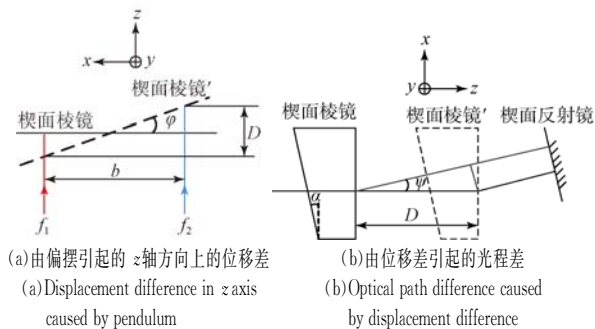


图 5 楔角棱镜偏摆引起的光程差变化

Fig. 5 Variation of optical path difference caused by pendulum of wedge prism

2.5 直线度测量干涉装置

通过分析可知,论文所提直线度测量干涉装

置的测量精度高,而且不受阿贝误差的串扰,这就需要一组空间对称、同频率同侧分布的四光路系统。图 6 就是根据这需求设计的一种差动式平面反射镜干涉仪。

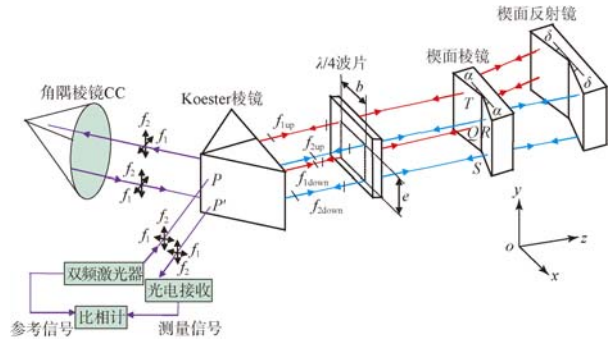


图 6 直线度测量干涉仪

Fig. 6 Straightness measurement interferometer

图 6 表示一束包含频率为 f_1, f_2 的正交线偏振光从双频激光器出射至 Koester 棱镜上半部分 P 点,偏振方向相互垂直的光 f_1 和 f_2 经由 Koester 棱镜偏振分光面分开后平行出射,光束之间的距离为 b 。 f_1 通过 $1/4$ 波片、楔面棱镜 T 点后被楔面反射镜按原来反射回 Koester 棱镜。同理, f_2 光也穿过 $1/4$ 波片、楔面棱镜被楔面反射镜反射回 Koester 棱镜。在 Koester 棱镜的偏振分光面处, f_1 和 f_2 光再次合光。由于两次经过 $1/4$ 波片, f_1, f_2 光的偏振方向互换,合光后从棱镜的另一面出射至角隅棱镜(CC)。通过 CC 将入射光向下平移(距离为 e),并回射至 Koester 棱镜, f_1 和 f_2 光再次被棱镜的偏振分光面分为两束平行光出射。与 Koester 棱镜上方的出射光相同,下方的 f_1 和 f_2 光也分别 2 次经过 $1/4$ 波片和楔面棱镜,并被楔面反射镜反射回 Koester 棱镜偏振分光面处。由于 2 次经过 $1/4$ 波片,合光后的 f_1, f_2 光从 Koester 棱镜的 P' 点出射,经过检偏器后形成拍频信号,即测量信号 I_M 。该测量信号与激光器的参考信号 I_R 同时输入频率计即可测得两信号的相位差,再根据公式(6)即可测得直线度偏移。图 7 就是本文所提方案的具体实现,该方案方便实用、结构简单、易于调节。

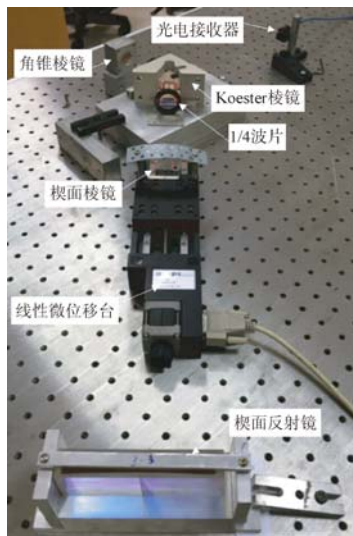


图 7 线性位移台直线度高精密干涉测量装置

Fig. 7 High-precision interferometric measuring devices for linearity of linear displacement table

3 试验结果

试验中,直线度干涉仪的光源为 ZYGO 公司的 He-Ne 稳频激光器,激光中心波长为 632.991 5 nm,通过光器内部的声光调制器可以得到两个频差为 20 MHz、偏振方向相互垂直的两束光(f_1, f_2)。相位计为 ZYGO 公司的 ZMI2000 系列的干涉仪位移测量系统。直线度测量是个动态测量过程,所以能否排除动态干扰是实现高分辨力实验的重要保证。从图 2 可以看出平移台前进方向的直线定位误差不会引起干涉测量信号的光程变化;同时,装置搭建好后只测一个方向的(图 1 中 x 方向)直线偏移,另外一个方向(图 1 中 y 方向)的直线偏移也不会引起干涉测量信号的光程变化(欲测 y 方向的直线偏移,需要将楔面棱镜和楔面反射镜同时旋转 90°)。

为验证上文所得出的分辨力,采用 PI 公司的 P-753 压电陶瓷纳米定位器垂直 z 方向驱动楔面棱镜。P-753 的闭环分辨力为 0.2 nm,设置移动步进为 9.0 nm。图 8 对比了纳米位移台位移和直线度干涉仪的测量结果,可见纳米位移台大约走两个步进,干涉仪测量值才变化一次。由此证明本文所提装置的分辨力约在 18.0 nm 左右,与计算所得 17.71 nm 的结果基本吻合。

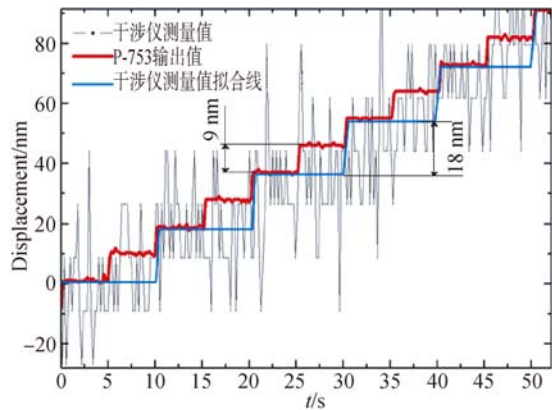


图 8 干涉仪测量值与压电陶瓷纳米定位器数值对比

Fig. 8 Comparison of measured values between interferometer and piezoceramic nano locator

为验证论文所提直线度测量方法不受阿贝误差串扰,将线性位移台更换为一个旋转台来模拟偏摆、俯仰和滚转角。所用旋转台为 PI 公司的 M-660.45,其最小角分辨力为 $4 \mu\text{rad}$ 。试验中,旋转台在 $[0, 1\ 000 \mu\text{rad}]$ 内往复运动,干涉仪输出为直线度,结果如图 9 所示。需要说明的一点是,此干涉仪设计的目的是实现直线度的高精度测量,对应的线性位移台一般也是精密位移台,这类平台在前进过程中的角分量误差并不大,通常 100 mm 行程对应的偏转角都是微弧度级,1 000 微弧度对应行程为米级,这对大多数精密定位装置而言已经很大了,因此实验参数选择合理。

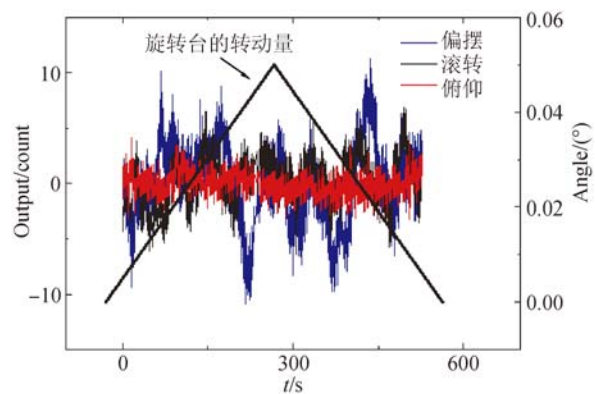


图 9 角分量对直线度测量的影响

Fig. 9 Influence of angular component on straightness measurement

图 9 中横坐标表示干涉仪的采集时间,纵坐标的主轴表示干涉仪输出,单位为 count(按直线

度计算 1 count=17.71 nm);次轴为旋转台传感器的输出。由于没有同步触发装置,故干涉仪采集数据的时间略低于旋转台的旋转时间,但不影响实验结果。从图 9 可以看出,通过旋转台往复运动模拟 3 个角分量时,干涉仪输出并未随台子的旋转产生规律的变化,说明论文提及的直线度测量没有引入阿贝误差。此外,相比旋转角和俯仰角,偏摆角引起干涉仪输出的波动更大,虽然干涉仪输出不具有明显的规律,但相对于另外两个角分量,直线度干涉仪对偏摆更敏感些,这也验证了前文对阿贝误差的理论分析结果。

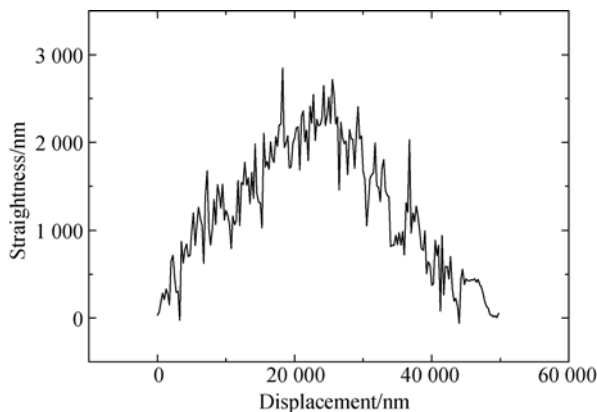


图 10 标准电控线性位移台的直线度测量结果

Fig. 10 Measurement results of straightness of standard electronic control linear displacement platform

图 10 是对 PI 公司的 M-605.2DD 高精度平移台直线度的测量结果。该平移台的行程为 50 mm,偏摆角为 $\pm 30 \mu\text{rad}$,符合实验条件。实

参考文献:

- [1] CHEN B, XU B, YAN L, *et al.*. Laser straightness interferometer system with rotational error compensation and simultaneous measurement of six degrees of freedom error parameters [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7):9052-9073.
- [2] 崔存星. 直线导轨激光六自由度几何运动误差同时测量方法与系统的研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2016.
CUI C X. *Study on Simultaneous Measurement Method and System of Geometric Motion Error of Six Degrees of Freedom of Linear Guide Laser* [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [3] 由凤玲, 冯其波, 张斌. 基于共路光线漂移补偿的直线度测量 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 515-519.

验结果显示在整个行程中,该平移台的一维直线度偏移为 $2.5 \mu\text{m}$ 。根据阿贝误差原则,该平移台的直线度误差应在 $3 \mu\text{m}$ 左右 ($60 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^3 = 3 \mu\text{m}$)。实验结果与理论计算相符合,该平移台可以达到厂商出产要求。

4 结 论

本文设计了一种空间对称 4 光路结构的直线度测量干涉仪,采用 2 个楔角胶合而成的楔面棱镜作为直线度传感器件,因此不需要通常所用的与行程同长的大反射参考镜。它结构简单、所用光学器件少、光路紧凑、方便实用,同时具备高测量分辨力,测量结果可直接溯源。由于测量系统的光路为空间轴对称结构, f_1, f_2 光均参与直线度测量,其它几个自由度误差引起的光程变化相互消除,使得直线度测量结果不受阿贝误差的干扰。值得一提的是, f_1 和 f_2 在棱镜胶合面两边是否完全对称分布并不对系统抗干扰和抑制阿贝误差能力产生影响。不过,考虑光路对称性,沿胶合面对称的正方形四光路更能体现该测量方案的特点。

该直线度干涉仪可测量水平直线偏移,也可以实现垂直直线偏移的测量,只需将楔面棱镜和楔面反射镜同时旋转 90° 即可。事实上,通过在角隅棱镜前加一个 $1/4$ 波片,该直线度测量干涉仪也可变为一种滚转角干涉仪^[21],测量精度高,而且具有对称光路的结构和特性,因此只需更换某些光学元件,即可实现 6 个自由度的测量。

- YOU F L, FENG Q B, ZHANG B. Measurement of straightness based on compensation for common path ray drift[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 515-519. (in Chinese)
- [4] RO S K, PARK J K, KIM B S, *et al.*. Actively compensated stage having 5-DOF motion error compensation and motion error compensating method: WO/2012/165872 [P]. 2012.
- [5] 徐斌. 激光外差干涉直线度测量的阿贝误差分析及补偿研究 [D]. 杭州:浙江理工大学, 2015.
XU B. *Abbe Error Analysis and Compensation Study of Laser Heterodyne Interferometric Straightness Measurement* [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015. (in Chinese)
- [6] 张贤根, 赵海伦, 庄卫星. 基于高精度设备制造的导轨直线度研究 [J]. *科技展望*, 2015(27): 127-128.
ZHANG X G, ZHAO H L, ZHUANG W X. Based

- on high precision equipment made of guide straightness research [J]. *Technology Outlook*, 2015 (27): 127-128. (in Chinese)
- [7] 闵永智, 党建武, 张振海. 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (6): 1621-1627.
MIN Y ZH, DANG J W, ZHANG ZH H. Image based ballastless track surface settlement online monitoring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (6): 1621-1627. (in Chinese)
- [8] FENG Q, ZHANG B, KUANG C. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(4): 279-283.
- [9] 匡萃方, 冯其波, 陈士谦, 等. 基于激光准直直线度测量方法的研究 [J]. *光学技术*, 2003, 29(6): 699-701.
KUANG C F, FENG Q B, CHEN SH Q, *et al.*. Study on straightness measurement method based on laser collimation [J]. *Optical Technique*, 2003, 29 (6): 699-701. (in Chinese)
- [10] 陈洪芳, 钟志, 丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1043-1047.
CHEN H F, ZHONG ZH, DING X M. Nonlinear error compensation of laser heterodyne interference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (5): 1043-1047. (in Chinese)
- [11] 陈科位, 于宏柱, 张善文, 等. 大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (11): 2900-2905.
CHEN K W, YU H ZH, ZHANG SH W, *et al.*. Design of large diffraction grating machine tool system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (11): 2900-2905. (in Chinese)
- [12] HRABINA J, ŠARBORT M, ACEF O, *et al.*. Optical frequency references for laser interferometry [C]. *Optics and Measurement Conference*, 2015; 94420F-94420F-6.
- [13] 夏豪杰, 胡梦雯, 张欣. 单频激光干涉仪正交信号的高精度处理 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2309-2316.
XIA H J, HU M W, ZHANG X. High precision processing of quadrature signal of single frequency laser interferometer. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (9): 2309-2316. (in Chinese)
- [14] RZEPKA J, BUDZYN G, FRACZEK W, *et al.*. Zeeman laser for straightness measurements [J]. *SPIE*, 2005, 5856: 625-629.
- [15] LIN S T. A laser interferometer for measuring straightness [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(33): 195-199.
- [16] SHYH-TSONG L, SHENG-LIH Y, CHI-SHANG C, *et al.*. A calibrator based on the use of low-coherent light source straightness interferometer and compensation method [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (22): 21929-37.
- [17] SOMMARGREN G E, YOUNG P S. Straightness of travel interferometer; U. S. patent 4787747 [P]. 1988.
- [18] 于毅. Zygo干涉仪及其应用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
YU Y. *Zygo Interferometer and Its Application Research* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [19] 钟朝阳, 句爱松, 乐燕芬, 等. 一种新型差分平面镜干涉仪 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 171-175.
ZHONG ZH Y, JU A S, LE Y F, *et al.*. A new type of differential plane mirror interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (11): 171-175. (in Chinese)
- [20] 乐燕芬, 句爱松. 外差激光干涉仪非线性误差分析及测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016(5): 203-212.
LE Y F, JU A S. Nonlinear error analysis and measurement of heterodyne laser interferometer [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2016 (5): 203-212. (in Chinese)
- [21] 侯文玫, 钟朝阳, 乐燕芬, 等. 高精度滚转角测量干涉仪 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(22): 22-27.
HOU W M, ZHONG ZH Y, LE Y F, *et al.*. High precision roll angle measurement interferometer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (22): 22-27. (in Chinese)

作者简介:



金涛(1985—),男,安徽合肥人,博士,副教授,2003年于皖西学院获得学士学位,2010年于上海理工大学获得硕士学历,2013年于日本群馬大学获得博士学位,主要从事精密测量的研究。E-mail:jintao@usst.edu.cn



刘景林(1992—),男,江西萍乡人,硕士研究生,2010年于江西理工大学获得学士学位,主要从事精密测量的研究。E-mail: 764455968@qq.com