DOI: 10.3901/JME.2020.20.012

一种滚转角和直线度同步干涉测量方法的研究^{*}

杨振堃 金 涛 韩梦莹 侯文玫

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 提出一种用于精密线性位移台滚转角和运动直线度同步测量的激光外差干涉系统。该干涉系统由一个 Koster 棱镜、角隅棱镜、分光镜、1/2 波片、直角棱镜、1/4 波片以及楔面棱镜和楔面反射镜组成。楔面棱镜作为测量运动直线度和滚转角的传感器固定在线性导轨上,当双频激光器的光射入干涉系统中后,形成空间对称的六光束测量信号。空间结构对称、系统共光路的特点使光学分辨率比普通的迈克尔逊干涉仪高一倍,光程死区达到最小。系统稳定性好,抗环境干扰能力强。光路对称使得增加或减小的光程变化相同,其他自由度引起的光程变化相互抵消,仅有运动直线度和滚转角的变化可以进入光程差,有效地排除其他自由度及阿贝误差的串扰,实现高精度测量。试验证明相互平行且不同频率的两束光在同一反射系统中发生运动直线度偏移和滚转角变化时,通过两束光携带的不同相位信息能直接得到运动直线度和滚转角的变化值。它不需要一条与行程同样长度的大反射镜作参考便能够实现高分辨率测量,简单实用,可直接溯源米定义。

关键词: 外差干涉仪; 运动直线度误差; 滚转角误差; 同步测量; 阿贝误差

中图分类号: TH711; TH712

A Research of Roll and Motion Straightness Synchronous Measurement Based on an Interferometer

YANG Zhenkun JIN Tao HAN Mengying HOU Wenmei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: A laser heterodyne interference system for the simultaneous measurement of the roll angle and motion straightness of a precision linear stage is presented. The interference system consists of a Koster prism, a corner cube, a beam splitter, a 1/2 wave plate, a right angle prism, a quarter wave plate, a wedge prism and a wedge mirror. The wedge prism is fixed on the linear guide as a sensor for measuring the straightness and the roll angle. When the light of the dual-frequency laser is injected into the interference system, a spatially symmetric six-beam measurement signal is formed. The spatial structure is symmetrical, and the system's common optical path makes the optical resolution twice as high as that of the ordinary Michelson interferometer, the optical path dead zone can be minimized. The system has good stability and strong resistance to environmental interference. The optical path symmetry makes the optical path variation of the increasing or decreasing the same. Only the change of the straightness and the roll angle can enter the optical path difference, effectively eliminating the crosstalk of other degrees of freedom and the crosstalk of the Bayer error enables high precision measurements. Experiments show that two beams of light parallel to each other and different frequencies are in the same reflection system. When the straightness shift and the roll angle change, the difference between the straightness and the roll angle can be directly obtained by the different phase information carried by the two beams. It does not require a large mirror of the same length as the reference for high resolution, it is simple, practical and can be directly traced to the meter definition.

Key words: heterodyne interferometer; motion straightness error; roll angle error; simultaneous measurement; abbe error

0 前言

超精密加工是先进制造技术的重要研究内容之

一,其一维运动的执行机构是直线导轨,因此,对直线导轨进行精确的定位与控制是实现精密加工与制造的关键问题^[1-2]。直线导轨运动时,在空间会产生线性(沿轴移动产生的定位误差、沿另外两个轴产生的直线度误差)以及角度(偏摆角、俯仰角及滚转角)共计 6 个自由度的误差^[3-5]。在 6 个自由度中,

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金(51605297)和国家自然科学基金中德科学中心(GZ 1287)资助项目。20191122 收到初稿,20200324 收到修改稿

滚转角的变化方向与导轨的运动方向正交，而且一般运动直线度测量方案还存在阿贝误差串扰的问题，需要对角度误差进行测量并进行误差修正^[6-12]。因而简单有效地对运动直线度和滚转角同步测量显得非常迫切和必要。

目前，运动直线度和滚转角同步复合测量方法一般存在于多自由度测量系统中。类似于基于激光准直的多自由度测量方案^[13]，运动直线度通过光束相在位敏探测器的位置偏移量来测量，但滚转角的分辨力还是较低，无法实现高精度测量，此外如果测量行程过大则该方法实用性不足。一些学者另辟蹊径通过电荷耦合器件 (Charge-coupled device, CCD) 记录波前干涉实现六自由度测量^[14]，但滚转角和运动直线度误差是通过间接计算得到的。也有学者提出基于单光束基准六自由度测量方案^[15]，能实现六自由度同时测量，具有测量位移范围大，测量速度高的优点。但测量系统过于复杂，且测量精度不高。以沃拉斯顿棱镜作为标靶的激光干涉测量法是通过测量相位变化计算运动直线度和滚转角误差^[16-17]。但该方法的测量精度和测量行程受沃拉斯顿棱镜出射光的夹角限制且不适用于测量大行程导轨副^[18]。此外，运动直线度测量结果难免存在阿贝误差的影响^[19-21]。一些解耦算法被提出用以分离各自由度之间的串扰提高测量的精度和准确度^[22-23]。除此之外，学者们还通过改进干涉仪结构对滚转角测量并消除串扰问题^[24-27]。在此基础上我们也提出了一种运动直线度测量方案^[19]，测量结果无阿贝误差串扰，但仅能针对一个自由度。

针对多自由度测量的需求，在前人的工作基础上，本文提出了一种可同步测量滚转角和运动直线度的激光干涉测量系统。本系统由双频激光光源、改进的差分平面镜干涉仪、滚转角和运动直线度传感器、反射镜和相位计构成。由双频激光光源和改进的差分平面镜干涉仪形成了空间对称的六路测量光路，最后在相位计上形成两路拍频信号分别用于滚转角和运动直线度测量。该干涉仪是一种外差干涉仪，相较于单频干涉仪而言抗直流信号强，同时，频率不同偏振态正交的一束光通过该系统可巧妙地形成对称光路，这既是消除其他自由度串扰的重要措施，又使得该测量系统具有光学分辨率高、光程死区达到最小、具有较高的稳定性和精度高等优点。同时该套系统能够有效避免测量滚转角带来的其他自由度的串扰。对于运动直线度误差而言，不同频率的光束光程变化可以相互抵消，不会给干涉后的拍频信号引入相位偏移；对于偏摆角误差而言，由

两个频率的光对角分布的特点使得不同频率的测量光引入的光程变化一致，该误差可以相互抵消；对于俯仰角误差而言，由两束不同频率的光束是互相平行的特点使得不同频率的光发生俯仰时的光程变化相同，不会给系统引入光程差变化。本干涉系统在使用分辨率为 $2\pi/512$ 的相位计测量滚转角和运动直线度测量的分辨率可以达到 $1.84 \mu\text{rad}$ 和 17.70 nm ，使用元器件少，空间结构简单稳定，若再添加其他元器件亦可进行多自由度同步测量。

1 测量原理

1.1 外差干涉仪

本文提出的自行搭建干涉系统如图 1 所示。该套干涉系统包含一个楔面棱镜、楔面反射镜、和一个外差干涉仪系统，Koster 棱镜 2^[28]、四分之一波片 3、楔面棱镜 4、楔面反射镜 5(楔面棱镜与楔面反射镜均由 K9 玻璃黏合而成)于同一光轴上依次排列。双频激光光源 1 设置于 Koster 棱镜斜面一侧，双出射光线从 Koster 棱镜的斜边入射至偏振分光膜，角隅棱镜 9 放置于 Koster 棱镜的另一侧，分光棱镜 BS6 置于角隅棱镜 9 及 Koster 棱镜之间，且与角隅棱镜 9 下半部分共线，三角棱镜 7 放置于分光棱镜 BS6 下部，二分之一波片 8 置于三角棱镜 7 与 Koster 棱镜 2 之间且与三角棱镜 7 黏合。相位计 36、起偏器 37 及光电检测器 38 放置在激光光源侧面向 Koster 棱镜 2 依次排列。

图1 干涉系统图

该系统中，双频激光光源 1 的光束 10(含有两个不同频率的线偏振光 f_1 和 f_2 ，其中一个偏振方向为水平，另一个为垂直)从 Koster 棱镜 2 的棱镜面入射到偏振分光膜上，同时双频激光光源 1 提供参考电信号 35 直接到相位计 36。偏振分光膜将光束 10 分为两束偏振方向相互正交的 p 光 11 和 s 光 14，其中 p 光的振动方向平行于入射面，s 光的振动方向垂直于入射面。光束 11 和光束 14 分别射

出 Koster 棱镜 2, 即光束 11 和光束 14。光束 11 和光束 14 通过 1/4 波片 3 后, 光束 12 和光束 15 在楔面棱镜 4 中发生折射, 折射光由楔面棱镜 4 射出光束 13 和光束 16 后进入楔面反射镜 5 并按原路返回, 由于两次经过 1/4 波片, p 光 11 转变为 s 光 11, s 光 14 转变为 p 光 14。光束 11 和光束 14 在 Koster 棱镜 2 中汇聚成光束 17, 并 Koster 棱镜 2 的一面射出。

测量运动直线度时, 光束 17 经角隅棱镜 9 反射后变成光束 18。光束 18 经过分光镜 BS6 后分为光束 19 和光束 20。光束 19 直接进入 Koster 棱镜 2 中, 并分为光束 21 和光束 24, 其中光束 24 为 p 光, 光束 21 为 s 光。光束 21 和光束 24 通过 1/4 波片 3 后, 光束 22 和光束 25 在楔面棱镜 4 中发生折射, 折射光由楔面棱镜 4 射出光束 23 和光束 26 后进入楔面反射镜 5 并按原路返回, 由于两次经过 1/4 波片, p 光 24 转变为 s 光 24, s 光 21 转变为 p 光 21。光束 24 和光束 21 在 Koster 棱镜 2 中汇聚成光束 27, 并 Koster 棱镜 2 的入射面射出光束 27。光束 27 通过起偏器 37 后, 由光电检测器 38 接收后, 转变成为电信号 39。电信号 39 与参考信号 35 一同进入相位计 36, 用于测量正弦电测量信号与参考信号之间的相位差。

测量滚转角时, 光束 20 经过分光棱镜 BS6 反射后, 经过直角棱镜 7 反射和 1/2 波片后变成光束 20, 光束 20 由于经 1/2 波片, p 光变为 s 光, s 光变为 p 光。光束 20 直接进入 Koster 棱镜 2 中, 并分为光束 28 和光束 31, 其中光束 31 为 p 光, 光束 28 为 s 光。光束 28 和光束 31 通过 1/4 波片 3 后, 光束 29 和光束 32 在楔面棱镜 4 中发生折射, 折射光由楔面棱镜 4 射出光束 30 和光束 33 后进入楔面反射镜 5 并按原路返回, 由于两次经过 1/4 波片, p 光 31 转变为 s 光 31, s 光 28 转变为 p 光 28。光束 28 和光束 31 在 Koster 棱镜 2 中偏振分光膜上汇聚成光束 34, 并在 Koster 棱镜 2 的入射面射出光束 34。光束 34 通过起偏器 37 后, 由光电检测器 38 接收后, 转变成为电信号 40。电信号 40 与参考信号 35 一同进入相位计 36, 用于测量正弦电测量信号与参考信号之间的相位差。

楔面棱镜前有六束光通过, 分布在楔面棱镜的入射面, 如图 2 所示。其中 T 为 f_{1p} 的入射点, R 为 f_{2s} 的入射点, M 为 f_{1s}' , N 为 f_{2p}' , S 为 f_{2s}' , Q 为 f_{1p}' 。可以通过 T, R, S, Q 组成的四光路系统测量滚转角, 通过 T, R, M, N 组成的四光路系统测量运动直线度。

图 2 六光路分布图

1.2 运动直线度测量原理

假设楔面棱镜具有垂直于运动方向(Z 轴)的横向偏差(X 轴)。光路的实际位置是不变的。然而, 折射率的差异将导致楔面棱镜中光束的光路产生变化。运动直线度的测量原理基于光束的路径, 如图 3 所示。图 3 显示了运动直线度测量中光路的变化。虚线部分是楔面棱镜的初始位置, 实线部分是楔面棱镜沿 X 轴方向发生移动后所到达的位置。

图 3 运动直线度测量光路变化图

图 4 显示出了楔面棱镜上的四个光路沿光轴方向的投影。虚线部分表示楔面棱镜移动之前的位置, 实线表示移动后的位置, 移动的距离为 d 。假设光束随棱镜一起移动, 它们的位置将从 T, R, M, N 移到 T', R', M', N' 。

从 Y 轴方向来看, 原始光束将移动到 f_{1p}' 和 f_{2s}' 的位置, 如图 5 所示。

实际上, 光束没有移动, 移动的是楔面棱镜。因此可以将其视为光束 f_1 的向内偏移, 光束 f_1 的 2 条光路相对未发生偏移前的光路位置朝着楔面棱镜内端方向偏移, 即光束在玻璃种经历的路程减少了;

另一方面, 光束 f_2 的 2 条光路朝着楔面棱镜外端的方向偏移, 即光束在玻璃中经历的路程增加了。由于四条光路是中心对称的, 它们的几何距离偏差的绝对值相等, 即它们的光程差的绝对值也相同。因此, 当 f_1 和 f_2 再次汇合形成拍频信号后, 其光程差只反映了楔面棱镜在 X 方向的直线度偏差。

图4 光路投影图

图5 光路变化前后对比图

设通过楔角棱镜的光束的光路变化为 l , 而楔角棱镜的楔角为 α 。则有

$$l = d \sin \alpha \quad (1)$$

其中 l 与光程差 Δl 直接相关。由于不同频率的每一束光通过楔面棱镜四次, 两个频率的光程变化一个为正值另一个为负值。 Δl 和 l 之间的关系可以表示为

$$\Delta l = 8l(n_g - n_a) \quad (2)$$

式中, n_g 和 n_a 分别表示玻璃和空气的折射率。假设玻璃的折射率为 1.516 30(为便于计算, 本文使用的近似值为 1.5), 空气为 1.000 27(为便于计算, 此处使用的近似值为 1.0), 因此

$$\Delta l = 4l = 4d \sin \alpha \quad (3)$$

根据图 3, 运动直线度可描述为

$$d = \frac{\lambda}{8\pi \sin \alpha} \Delta \varphi \quad (4)$$

式(4)建立了运动直线度和相位差之间的关系。因此可以使用相位计通过参考信号和测量信号的相位差来得到运动直线度误差。

1.3 滚转角测量原理

图 6 是图 2 所示空间对称的四光路平面图分解。从图 2 和图 6 中可以看出, 无论被测物体是否滚动, 入射光的入射位置都是不变的, 都是垂直于 T, R, S, Q 四个光束路径的横截面, 由 f_{1p} 、 f_{2s} 、 f_{2s}' 、 f_{1p}' 组成的边长为 b 的正方形将由其他光路的交点形成。

图6 光路平面分解图

如果从垂直于楔形棱镜横截面的方向(即从 A 方向)观察, 则 f_1 和 f_2 的两个上下光学路径在滚动之前会在一条线上重叠, 由 $f_{1,2}$ 表示。滚动后, f_1 的两个光路将沿着滚动前的楔面棱镜上的楔角半径方向从原始路径向内偏离, 而 f_2 的光路将向外偏离, 如图 7 所示。

图7 滚转角原理俯视图

将这些偏差值分别设置为 d_1 和 d_2

$$\sin \theta = \frac{d_1 + d_2}{b} \quad (5)$$

$$\begin{cases} d_1 = b_1 \sin \theta_1 \\ d_2 = b_2 \sin \theta_2 \\ b_1 + b_2 = b \\ d_1 + d_2 = b \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

楔面棱镜由玻璃制成, 棱镜外部的介质假定为空气(尽管理论上是成立的, 即使是真空或其他介质也是如此), 这也导致出现了两种不一致的介质常量。尽管两个频率的光束传播的总几何距离保持不变, 但光路将发生变化。 f_2 的两个光路向外移动(如图8所示, 从光线A到光线 A_1); 即光路路径增加。同理, f_1 的两个光路向内移动(如图9所示, 从光线A到 A_2), 即光路路径长度减小。其中 A_1C 是增加的片段, A_2H 是减少的片段。

图8 f_2 光路偏移局部放大图

图9 f_1 光路偏移局部放大图

考虑到图4所示的平面图的原理, 可以计算出以下关系式

$$\Delta l_1 = A_1C = \frac{A_1D}{\cos(\alpha - \beta)} = \frac{d_1 \sin \alpha}{\cos \beta \cos(\alpha - \beta)} \quad (7)$$

$$\Delta l_2 = A_2H = \frac{d_2 \sin \alpha}{\cos \beta} \quad (8)$$

式中, β 是楔面反射镜的夹角。由于每个频率的光束必须四次通过楔形棱镜, 因此总光程差为

$$\Delta L = 4(\Delta l_1 + \Delta l_2) \cdot (n_g - n_a) \quad (9)$$

式中, Δl_1 、 Δl_2 表示测得的光程差, n_g 表示玻璃的介质常数, 而 n_a 表示空气的介质常数。为便于计算, 本文设 n_g 为 1.5, n_a 为 1, 则

$$\sin \theta = \frac{\lambda \cos \beta}{4\pi \sin \alpha \left(\frac{b_1}{\cos(\alpha - \beta)} + b_2 \right)} \Delta \phi \quad (10)$$

滚转角 的值可以通过测量 $\Delta \phi$ 来得到。

通过测量光束 f_{1p} 和光束 f_{2s} 之间的相位差, 可以得到楔面棱镜的滚转角和运动直线度。在本文中, 为了考虑现实因素, 将式(3)和(8)的参数设置为 $\alpha = 1^\circ$, $\beta = 0.5^\circ 59'$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $b = 19 \text{ mm}$ 。所使用的干涉仪的相位分辨率为 $2\pi/512$ 。滚转角和运动直线度的测量分辨率可以分别达到 $1.84 \text{ } \mu\text{rad}$ 和 17.70 nm 。

滚转角和运动直线度系统设计同步测量的实现基于以下两个因素: ① 楔面棱镜的入射表面与楔面反射镜的入射表面之间的光程变化相互抵消; ② 滚转角四光路的中心是中心对称的正方形中心。

2 试验结果

根据图1理论搭建出来的实物测量系统如图10所示。

图10 试验环境实物搭建图

采用频为 20 MHz 的激光器(Zygo7702)作为本次试验的激光源, 干涉装置包括一个 Koster 棱镜、一个四分之一波片、一个二分之一波片、一个分光棱镜、一个直角棱镜以及一个角隅棱镜。在线性位移台上的楔面棱镜作为测量滚转角和直线度的传感器装置, 利用楔面反射镜将光路原路返回并通过角

隅棱镜和直角棱镜将光束返回到干涉仪中行程稳定的六光路系统。如图 2 所示。呈矩形的四光路用来测量运动直线度，呈正方形的四光路用来测量滚转角。参考信号直接由激光器进入相位计 ZMI2400，与通过干涉产生的测量信号进行比较。本次同步测量滚转角和运动直线度的试验在线性位移台 M403.42S 上完成。

首先对试验系统的稳定性进行验证，图 11、12 分别展示了在该套试验装置下的直线度和滚转角的静态稳定性特征。相位计 ZMI2400 的输出单位为 count，该相位计的分辨率为 $1 \text{ count} = 2\pi/512$ ，试验结果表明，在 600 s 的时间内该试验系统具有良好的稳定性。

图 11 滚转角稳定性

图 12 直线度稳定性

为了确认所提出的测量系统的重测可靠性，计算重复性的公式为

$$Re^* = 1 - \frac{1}{\sqrt{F}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n}} \times 100\% \quad (11)$$

式中， n 表示试验次数， r_i 表示试验数据， $\bar{r}$ 是从 n 次试验重复中获得的平均值。我们设定在位移台(全程是 100 mm)0 mm 处为测量的起点，从 0 mm 处移动到 30 mm 处，再从 30 mm 处回到 0 mm 处为滚转

角行进的一个周期，电机移动速度为 0.5 mm/s，每个周期之间设置 20 s 的间隔。接着再从 50 mm 处为测量的起点，从 50 mm 处移动到 70 mm 处，再从 70 mm 处回到 50 mm 处为运动直线度行进的一个周期，速度不变。图 13、14 给出了 5 个周期测量到的滚转角误差和运动直线度误差的值，从图中可以看到系统的重复性完好，根据式(11)和图 13、14 测得的数据可以得到滚转角系统可重复性约为 96%，运动直线度系统可重复性约为 97%。

图 13 滚转角周期性测试

图 14 直线度周期性测试

最后将楔面棱镜固定在电动位移台 M403.42S 上，通过本文提出的干涉系统对直线度和滚转角进行同步测量。以 0 mm 处为起点，移动到 30 mm 处，经过 30 s 的延时回到 0 mm 处，对实测数据进行观测，如图 15、16 所示。

由图 15 可知，在 60 mm 的行程内，测得的滚转角误差在 60 μrad 内，参考文献[29-30]，对比验证分辨率的可靠性，且其关于滚转角测量的准确性可达 0.44 μrad ，参考其 0~60 mm 测量范围内，滚转角误差约为 13.2 μrad ，约是本系统测量值的四分之一，可以验证本系统所测值的正确性。

图15 滚转角测量图

图16 直线度测量图

由图16可知,在整体行程内,运动直线度误差大约在 $3.5 \mu\text{m}$,该位移台给定的 Pitch/yaw 参数为 $\pm 200 \mu\text{rad}$,通过公式可以计算出该线性位移台的直线度理论最大值为 $400 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3 = 40 \mu\text{m}$,可判断本次测量符合要求。对比文献[19]验证分辨率可靠性,再参考文献[23],通过其提出的校正加工算法,在 $0 \sim 60 \text{ mm}$ 行程内运动直线度误差约为 $1.17 \mu\text{m}$,而在应用算法之前,其运动直线度误差约为 $4.2 \mu\text{m}$,由此可说明本次测量是合理的。

在本系统中,要同步测量滚转角和直线度的值,需满足以下要素:① 试验系统中的六光路平行且对称;② 滚转角系统中的四光路要形成边长为 b 的正方形(试验中的 b 值根据 Koster 棱镜的宽度来决定);③ 用于测量运动直线度误差的两束光以及测量滚转角误差的两束光在光路的出口位置重合,以减少余弦误差带来的串扰。

3 误差分析

3.1 系统环境带来的误差分析

空气的湿度、温度,大气压以及空气中二氧化碳等的含量等因素都会对光在空气中的折射率产生影响(相较于真空来说),因此如果上述因素发生变

化,则可能会对测量结果产生影响。针对上述问题,本试验中将试验环境的温度和湿度设置为恒定值并保证不会产生非常大的变化,避免更多的空气扰动以及白炽灯的影响,采用专业遮光布罩住整个气浮台,并用遮光罩罩住试验系统,仅留下可以通过光束的小孔。同时根据本试验装置的特性,由于光束是对称分布的,使得光束死程的误差能够尽可能地减到最小,因此在测量过程中我们认为环境因素的改变对六光束的影响非常接近,可以认为两个频率的光束受到的影响可以相互抵消。从图11、12的结果来看,在很长一段时间内相位计的输出在 1 count 左右,而且该误差属于随机误差,可以将其拟合掉。由于干涉臂中存在干涉混叠,导致干涉仪有非线性误差,但是一般幅值只有几个纳米,不对分辨力产生影响。

3.2 余弦误差分析

当以测量激光为基准的光轴与位移台的运动方向不在同一直线上时,会产生余弦误差,使得实际测量值要比理论上的测量值要短。在本试验系统中如果产生余弦误差主要是指安装位移台以及楔面棱镜的时候位置的摆放出现偏差而产生的余弦误差。该误差属于系统误差,可消除,不会影响试验分辨力。

3.3 阿贝误差分析

以往的直线度测量过程总会产生阿贝误差的干扰,这是由于在运动过程中产生的角分量而引起的(偏摆、俯仰和滚转)。而在本文提到的系统中的对称结构则有效地避免了阿贝误差的串扰,下面具体分析每个角度误差。

对俯仰角而言,当楔面棱镜沿着 X 轴发生旋转时会产生俯仰角误差,发生俯仰运动时光束的空间位置也没有变化,只是在楔面棱镜的 Y 轴方向上有所变动,它们的投影与原来光束的位置是重合的,所以改变后的光束与对称中轴的距离也没有产生变化,两个频率的光之间没有光程差的变化,所以测得的相位差不会有变化,即俯仰角引起的阿贝误差不影响直线度测量结果。

对滚转角而言,当楔面棱镜沿着 Z 轴发生旋转时,即会产生滚转角误差,由于是对称分布,所以光束离中轴的距离都相等,单个频率的光束离中轴的距离之和都是正方形的边长。因此两个频率的光束之间的光程差是不变的,所测得的相位差也不变,说明滚转角所引起的阿贝误差同样不会影响直线度的测量结果。

对偏摆角而言,当楔面棱镜沿着 Y 轴发生旋

转时, 就会产生偏摆角误差, 而且由于频率不同的两束光位于中轴的两边, 导致光程差发生了变化。由于一般情况下的测量装置中, 传感器部分和移动平台的衔接牢固, 所以在高精密移位仪器中, 一般偏摆角都很小, 约在微弧度级别, 由它所引起光束在楔面棱镜上的位移也很小。当偏摆角产生时, 入射到楔面棱镜上的入射角和出射的折射角都会产生很小的变化 φ , 不利于分析。但由于这个 φ 很小, 可以近似认为光按照原路返回, 当发生偏摆时, 两束不同频率的光在 Z 轴上并不是以同一坐标入射到楔面棱镜上, 而其相对位置的变化量为 $D = b \tan \varphi$, 所以光程差的变化量为 $\Delta l = D(1 - \cos \psi) = b \tan \varphi(1 - \cos \psi)$, 其中 ψ 为光从楔面棱镜出射时的折射角(楔面棱镜的楔角 $\alpha = 1^\circ$, 材料为 K9, 所以 $\psi = 0.51^\circ$)。以本次试验的位移台 M403.42S 为例, 其偏摆角为 $\varphi = 400 \mu\text{rad}$, 从 Koster 棱镜中出射两束平行光间距 $b = 19 \text{ mm}$, 可以算出 $\Delta l = 0.3011 \text{ nm}$, 则总的光程差 $\Delta L = 8\Delta l = 2.409 \text{ nm}$, 于运动直线度 $d = 17.70 \text{ nm}$ 而言可以忽略不计, 因此可以认为偏摆角也不会对运动直线度测量结果产生影响。

4 结论

提出了一种用于同步测量滚转角和运动直线度的高精密干涉系统, 用楔面棱镜作为测量滚转角和直线度的传感器。将一束正交偏振光束分为空间对称的六束测量光。干涉系统在使用 $2\pi/512$ 的相位计时滚转角和运动直线度测量的分辨率可以达到 $1.84 \mu\text{rad}$ 和 17.70 nm 。使用更高精密细分相位计可以达到更高的分辨率; 用六光束外差干涉仪同步测量高精度线性平台沿行进方向的滚转角和运动直线度, 光路结构紧凑、光路数量最少、占用空间以及材料面积小、光程死区最小且分辨率高。由于测量的光路空间对称, 所测量的滚转角和运动直线度并不会受其他自由度的影响。若用更高精度的相位计则能为大行程位移台的高精度干涉测量提供解决方案。

参 考 文 献

- [1] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 25-30.
- [2] 马雅丽, 李阳阳. 基于几何误差不确定性的滚动导轨运动误差研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 11-18.
- [3] 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.
- [4] HSIEH H, PAN S. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2451-2465.
- [5] ZHAO Yuqiong, ZHANG Bin, FENG Qibo. Measurement system and model for simultaneously measuring 6DOF geometric errors[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 20993-21007.
- [6] 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.
- [7] 韩晓辉, 李阳, 周庆祥, 等. 兰姆波在搭接焊缝上的干涉[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 87-93.
- [8] ZHA Jun, WANG Zhiwei, XUE Fei, et al. Effect of working position on vertical motion straightness of open hydrostatic guideways in grinding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 46-52.
- [9] 匡萃芳, 冯其波, 刘斌. 滚转角测量方法综述[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 699-702.
- [10] 曹睿, 张斌, 冯其波, 等. 多自由度误差同时测量中的滚转角测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2344-2348.

- measuring system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2344-2348.
- [11] 翟玉生. 多自由度误差同时测量中滚转角高精度测量方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZHAI Yusheng. Studies of high-precision roll measurement methods for simultaneous measurements of multi-degree-of freedom errors[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] 翟玉生, 张志峰, 苏玉玲, 等. 一种多自由度误差同时测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 110-114.
- ZHAI Yusheng, ZHANG Zhifeng, SU Yuling, et al. A multi-degree-of-freedom geometric errors measurement method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 110-114.
- [13] NI J, WU S. An on-line measurement technique for machine volumetric error compensation[J]. *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, 1993, 115(1): 85-92.
- [14] 吕勇, 冯其波, 刘立双, 等. 基于多准直光的六自由度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3597-3602.
- LÜ Yong, FENG Qibo, LIU Lishuang, et al. Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3597-3602.
- [15] 匡萃方, 冯其波, 张志峰, 等. 同时测量物体六自由度的方法[J]. *激光技术*, 2005, 29(5): 491-493.
- KUANG Cuifang, FENG Qibo, ZHANG Zhifeng, et al. Methods for simultaneously measuring six freedom degrees of objects[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 491-493.
- [16] BALDWIN R, CALIF S. Interferometer system for measuring straightness and roll: US, 3790284[P]. 1974-02-05.
- [17] 杨新刚, 黄玉美, 朱德祥, 等. 基于激光干涉仪的垂直轴滚转角误差测量方法[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(12): 1399-1402.
- YANG Xingang, HUANG Yumei, ZHU Dexiang, et al. A method to measure vertical axis roll angular errors of machine tool based on laser interferometer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(12): 1399-1402.
- [18] LIN S. A laser interferometer for measuring straightness[J]. *Optics and Laser Technology*, 2001, 33(3): 195-199.
- [19] 金涛, 刘景林, 乐燕芬, 等. 线性位移台直线度高精度外差干涉测量装置[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1570-1577.
- JIN Tao, LIU Jinglin, LE Yanfen, et al. High-precision straightness interferometer for linear moving stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1570-1577.
- [20] ZHANG Enzheng, CHEN Benyong, SUN Jianjun, et al. Laser heterodyne interferometric system with following interference units for large x-y-theta planar motion measurement[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13684-13690.
- [21] 杨涛. 激光外差干涉仪大范围位移和角度同时测量系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
- YANG Tao. Design and implementation of the simultaneous measurement system of large range displacement and angle based on laser heterodyne interferometry[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [22] KHIM G, OH J, PARK C. Analysis of 5-DOF motion errors influenced by the guide rails of an aerostatic linear motion stage[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2014, 15(2): 283-290.
- [23] KHIM G, PARK C, SHAMOTO E, et al. Prediction and compensation of motion accuracy in a linear motion bearing table[J]. *Precision Engineering*, 2010, 35(3): 393-399.
- [24] 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 Wenmei, ZHONG Chaoyao, LE Yanfen, et al. High precision roll angle interferometer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(22): 22-27.
- [25] 句爱松, 侯文玫, 杨卫, 等. 改进型的滚转角测量干涉仪[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708001-1-0708001-6.
- JU Aisong, HOU Wenmei, YANG Wei, et al. Enhanced roll-angle measurement interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0708001-1-0708001-6.
- [26] JIN Tao, XIA Guizheng, HOU Wenmei, et al. High resolution and stability roll angle measurement method for precision linear displacement stages[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(2): 023102-1-023102-5.
- [27] LE Yanfen, HOU Wenmei, HU Kai, et al. High-sensitivity roll-angle interferometer[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3600-3603.
- [28] 刘景林. 无阿贝误差的直线度外差干涉测量及非线性补偿的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2019.

LIU Jinglin. Research on straightness heterodyne interferometry without abbe error and nonlinear compensation[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2019.

[29] ZHAI Yusheng, ZHANG Zhifeng, SU Yuling, et al. A high-precision roll angle measurement method[J]. Optik, 2015, 126(24): 4837-4840.

[30] JIN Tao, HAN Mengying, LIU Jinglin, et al. A

heterodyne interferometer for simultaneous measurement of roll and straightness[J]. IEEE Access, 2019, 7(2169): 133257-133264.

作者简介: 杨振堃, 男, 1994 年出生。主要研究方向为高精度干涉测量。

E-mail: 915653079@qq.com

金涛(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为高精度干涉测量。

E-mail: jintao@usst.edu.cn