

# 改进型的滚转角测量干涉仪

句爱松 侯文玫 杨 卫 罗佳林 柯有龙

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 所有的机械导轨运动副都具有三个回转自由度或称为角运动误差,包括俯仰角、偏摆角和滚转角误差,其中滚转角由于其产生的特别原因,而最难测量。针对现有的以对称的双楔角棱镜和对称的双楔面反射镜组成的滚转角测量干涉仪,提出了利用单楔角和单楔面反射镜的高精密滚转角测量干涉仪系统。由于系统所需光学元件较少,在实现相同测量分辨率的情况下,更有利于光学元件的加工和安装调试。系统中不同频率的两束光的传播路径相互平行,因此能够有效地减小死程误差和排除其他自由度的干扰,系统稳定性更好。使用普通的 $2\pi/512$ 细分相位计,滚转角测量分辨率为 $2\ \mu\text{rad}$ 。

**关键词** 相干光学; 滚转角; 干涉仪; 共光路

**中图分类号** O439

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0708001

## Enhanced Roll-Angle Measurement Interferometer

Ju Aisong Hou Wenmei Yang Wei Luo Jialin Ke Youlong

*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** All guide kinematic pair of machine tools have three rotating degrees of freedom which include pitching angle, yaw angle and roll angle, in which the roll angle is mostly difficulty to measure for the producing reasons. The existing roll angle measurement interferometer is comprised of two symmetrical wedge prisms and two symmetrical wedge mirrors. A enhanced roll angle measurement interferometer which only uses one wedge prism and one wedge mirror is proposed. The proposed system uses less optical component and has implemented the same measurement resolution, which is more stability. The two beams with different frequencies are paralleled which is efficient for reducing the dead path errors and eliminating the cross talk of other freedom errors. By using the phase meter of which the resolution is  $2\pi/512$ , the roll angle resolution of this system is  $2\ \mu\text{rad}$ .

**Key words** coherence optics; roll angle; interferometer; common path

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.4640

## 1 引 言

随着现代工业技术的发展,对超精密位移的精度要求越来越高,例如超精密机床的定位精度已经小于100 nm或者几十纳米,在光刻机的扫描定位工作台,测量精度要求只有几个纳米,甚至1 nm以下。位移精度要求的不断升级,就意味着必须对位移运动中的各种转角进行严格控制,以保证相应的位移精度指标。所有机械导轨运动都具有三个转角误差(俯仰、偏摆和滚转误差)。俯仰角和偏摆角用外差干涉仪来测量可以达到很高的精度,而滚转角的测量则是非常困难的,目前国内外还处于研究和探索阶段<sup>[1-3]</sup>。国内外的相关领域都对这一问题进行过研究,利用自准直法测量滚转角,其关键技术是利用一块与行程同样长的平面反射镜。这块平面反射镜一般安装在被测件上随之运动,光源发出的光束射向平面反射镜,被反射回来由光电探测器接收,当被测件发生滚转角时,被反射到光电探测器接收面上的光点位置发生变化,通过测量光

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51075280)、沪江基金(C14002)

作者简介: 句爱松(1986—),男,博士研究生,主要从事微纳米测量技术方面的研究。E-mail: hbjas@163.com

导师简介: 侯文玫(1950—),女,博士,研究员,主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。E-mail: houwenmei@vip.citiz.net

点位置的变化量和光源与平面反射镜之间的距离,即可测出滚转角,这种方法可以得到很高的分辨率,但是干扰因素也很多,例如大长度平面反射镜的平面度,以及温度、应力变形的影响,为此也出现了各种改进方案<sup>[4-5]</sup>。如今被研究最多的方法是基于相位延迟片和外差相位探测的方法,双频激光器的出射光经过一个1/4波片(波片光轴与两正交线偏振光成45°放置),可以将两束不同频率的线偏振光变成两个方向相反的圆偏振光。检偏器与被测件固定在一起,检偏器的转动会使其透过的两束不同频率的光的相位发生相反的变化,通过光电探测器检测其干涉信号的相位差变化,就可以得到滚转角的变化<sup>[6-9]</sup>。这种方法可以实现整周测量,但是测量分辨率不是太高。其改进方案设置1/4波片的光轴在一个特定的角度,使其在小角度范围内有一个灵敏度倍增区<sup>[7]</sup>。

利用外差干涉测量滚转角最早追溯到1974年,Baldwin等<sup>[10]</sup>提出了一种可以测量直线度和滚转角的干涉仪系统。通过测量垂直距离上两个位置直线度的变化,即可计算出滚转角的变化。但这种方法使用两个昂贵的Wollaston棱镜,而且很难调整反射镜和Wollaston棱镜的角度位置。后来Hou等<sup>[11-12]</sup>提出一种基于差分平面干涉仪的滚转角测量系统,其关键技术利用Kosters棱镜和其他光学元件形成一个中心对称的四光束系统,滚转角测量的核心元件是一个成对称分布的双楔角棱镜和一个成对称分布的双楔面反射镜。相同频率的光分别经过楔形棱镜和楔面反射镜的对角位置,当楔形棱镜发生滚转变化时,会引起不同频率光的光程发生变化,通过测量其干涉信号的相位差变化即可得到滚转角的变化,这种方法可以实现微弧度数量级的测量分辨率。

基于Hou等<sup>[11-12]</sup>的光学系统,本文提出了一种改进型的滚转角测量系统,滚转角测量的核心元件是一个楔形棱镜和一个楔面反射镜,利用Kosters棱镜将两束不同频率的偏振方向正交的线偏振光分为两束平行光,先后通过楔形棱镜和楔面反射镜。为了进一步提高其测量分辨率,利用1/4波片和角锥棱镜使两束不同频率的光再次经过楔形棱镜和楔面反射镜,其拍频光由光电探测器接收。其中楔形棱镜发生滚转角变化会引起两束不同频率的光产生光程变化,通过测量拍频光的相位差变化,即可获知滚转角的变化大小。

## 2 滚转角测量原理分析

新的滚转角测量系统的原理图如图1,整个滚转角干涉仪系统的光学部分由Kosters棱镜,1/4波片,楔形棱镜,楔面反射镜和角锥棱镜组成,其中楔形棱镜作为滚转角传感元件,固定在待测的运动平台上面,而楔面反射镜则固定不动。

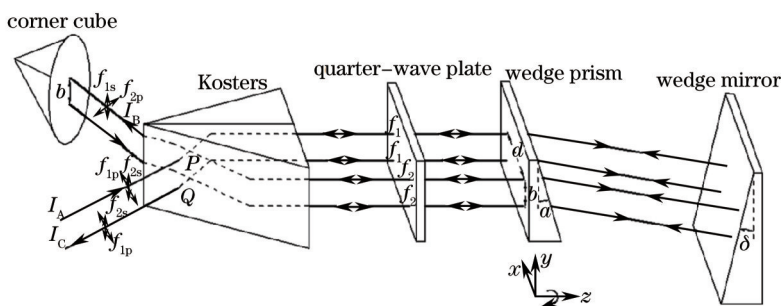


图1 滚转角测量干涉仪的光学原理图

Fig.1 Optical schematic of roll-angle measurement interferometer

外差激光器的出射光 $I_A$ 包含偏振方向水平的线偏振光 $f_{1p}$ 和偏振方向竖直的线偏振光 $f_{2s}$ ,这两束光具有一个微小的频差,一般在兆赫兹级别。入射至Kosters棱镜分光面的P点,两束不同频率的光在分光面处分别透射和反射,然后经两反射面全反射后平行出射。两束平行光(偏振方向水平的 $f_1$ 和偏振方向竖直的 $f_2$ )分别经过1/4波片和楔形棱镜(楔角 $a$ 为1°)后,以一微小角度斜向下出射,经楔面反射镜反射后原路返回,由于先后两次经过1/4波片(光轴与水平和垂直方向成45°夹角),原来偏振方向水平的光变为垂直偏振光,原来偏振方向竖直的光变为水平偏振光,即 $f_1$ 光变为垂直偏振光,在Kosters棱镜的分光面处表现为反射, $f_2$ 光变为水平偏振光,在Kosters棱镜的分光面处表现为透射。两束光在Kosters棱镜的另一侧出射,经角锥棱镜反射后,反射光在竖直位置上与入射光相距为 $b$ ,入射至Kosters棱镜分光面的Q位置处, $f_1$ 光反射, $f_2$ 光透射,两束

光再一次透过 1/4 波片, 楔形棱镜, 楔面棱镜反射后原路返回, 由于经过 1/4 波片, 使  $f_1$  光变为水平偏振光, 使  $f_2$  光变为竖直偏振光, 在 Kosters 的分光面处  $Q$  处会合, 出射光  $I_c$  与入射光  $I_a$  在 Kosters 棱镜的同侧。由光纤传送到光电接收器, 作为外差干涉仪系统的测量信号。

图 1 中的楔形棱镜作为滚转角的传感元件, 随被测物体一起在  $z$  轴位置上移动。参考图 2, 为方便标示, 设置滚转中心为  $O$  点(滚转中心可以为  $xy$  平面内任何一点)。当楔形棱镜绕  $O$  点发生滚转时, 四束光的位置不发生变化。但四束光距离楔形棱镜底边的距离发生了变化。滚转前, 两组平行光束  $f_{1up}, f_{2up}$  和  $f_{1low}, f_{2low}$  距离底边  $OM$  相同, 滚转  $\theta$  角度后,  $f_{1up}$  与  $f_{2up}$  距离底边  $OM'$  的距离差  $h$  可以表示为

$$\sin \theta = \frac{h}{d}. \quad (1)$$

如图 3, 楔形棱镜的楔角为  $\alpha$ , 入射光垂直入射到楔形棱镜后, 出射光偏转一个微小的角度  $\beta$ 。当楔形棱镜相对于入射光的位置在  $y$  轴方向发生一定偏移  $h$  后, 光束的传播路径发生了变化, 由之前的  $A-B$  变为  $A-B'-C$ , 光束经过的几何路程几乎没发生变化(因为  $\overline{B'C} = \overline{B'B} \cdot \cos \beta \approx \overline{B'B}$ ), 但是光束经过楔形棱镜和空气的距离发生了变化, 从而导致光学路程却发生了变化。图 3 中的光束经过楔形棱镜的路程变化为

$$\Delta l = h \tan \alpha. \quad (2)$$

由于四束光先后两次经过楔形棱镜, 因此最后的出射光里面  $f_1$  分量与  $f_2$  分量之间的光程变化之差为

$$\Delta L = 4\Delta l(n_1 - 1), \quad (3)$$

式中  $n_1$  为楔形棱镜的折射率, 1 为空气的近似折射率。结合(1)~(3)式可得

$$\Delta L = 4(n_1 - 1)d \sin \theta \tan \alpha. \quad (4)$$

两束不同频率的光干涉后, 由光电接收器接收, 最后通过相位计读出此测量信号的相位的变化  $\Phi$  即可获知滚转的角度  $\theta$ 。相位计的输出可以表示为

$$\Phi = \frac{\Delta L}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{8\pi(n_1 - 1)d \sin \theta \tan \alpha}{\lambda} \approx \frac{8\pi(n_1 - 1)d \tan \alpha}{\lambda} \cdot \theta. \quad (5)$$

(5)式中, 由于  $\theta$  很小, 一般不超过  $1^\circ$ , 所以  $\sin \theta \approx \theta$ 。从(5)式中可以看出, 滚转角的变化  $\Phi$  与相位计的输出之间有确定的线性关系。此系统中,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ;  $n_1 = 1.6$ ;  $b = 15 \text{ mm}$ ;  $\alpha = 1^\circ$ , 如果使用分辨率为  $2\pi/512$  的相位计, 所设计的滚转角测量干涉仪的测量分辨率约为  $0.4'' (2 \mu\text{rad})$ 。

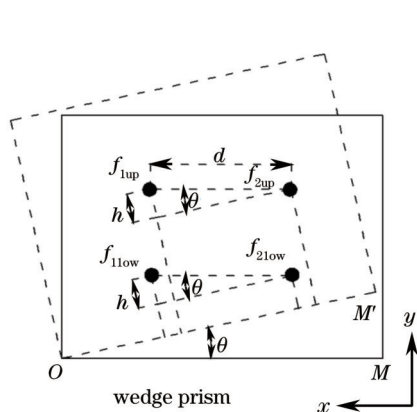


图 2 楔形棱镜上光斑位置变化  
Fig.2 Light spot changes on wedge prism

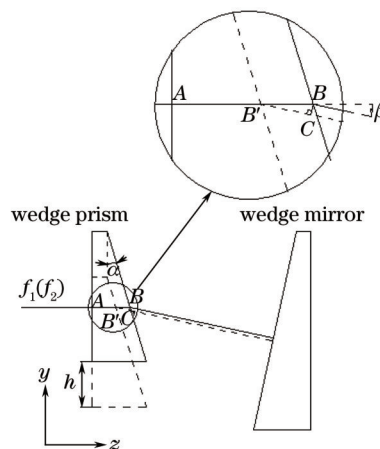


图 3 激光束传播路径变化  
Fig.3 Propagation path changes of laser beam

### 3 实验数据

为了证明此干涉仪系统的滚转角测量能力, 将楔形棱镜固定在精密旋转平台(M-660 of Physik Instrumente GmbH)上面。图 4 为楔形棱镜随精密旋转平台滚转角度的静态测量结果(也就是说楔形棱镜在  $z$  轴位置上不发生位移变化), 实验中, 控制旋转台绕  $z$  轴旋转, 步长为  $20 \mu\text{rad}$ , 中间停顿 4 s 用以采集数据, 共旋转  $180 \mu\text{rad}$  然后反向旋转至初始位置。实验结果证明了当楔形棱镜发生滚转时, 系统输出  $\Phi$  与滚转角度  $\theta$

符合(5)式的线性关系。

利用所设计的滚转角测量干涉仪对线性位移平台进行了测试,系统中,楔形棱镜固定在线性位移平台上面,控制线性位移平台以0.5 mm/s的运动速度往返100 mm,图5即为线性位移平台滚转角误差的3次测量结果,为方便显示,每次测量有10 μrad递增的初始滚转角。从图5可以看出,被测位移平台在100 mm内的最大滚转误差为306 μrad,且该系统具有很好的重复测量精度。

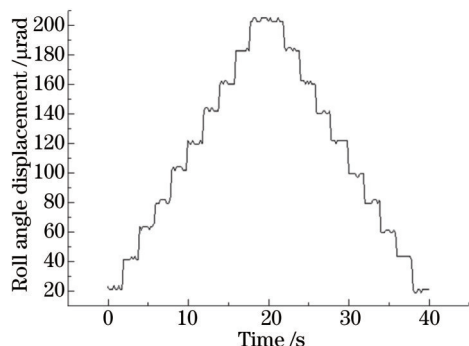


图4 滚转角静态测量结果

Fig.4 Static measurement result of roll angle

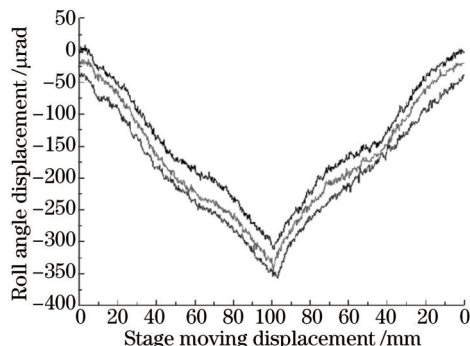


图5 线性位移台滚转角测量结果

Fig.5 Measured roll angle of a linear stage

#### 4 其他自由度的串扰

由于在滚转角测量过程中,有可能伴随着其他自由度误差的发生,因此一个好的滚转角测量系统应该不受其他自由度测量误差的影响。首先研究楔形棱镜沿z轴运动时,激光束的光程变化。如图6所示,当楔角棱镜沿z轴发生运动时,每一束光的光程均会发生变化,光程变化为

$$\Delta l = L_{OF} - L_{OE} = L_{OF}(1 - \cos\beta), \quad (6)$$

式中β为光束经过楔角棱镜后偏转角度,  $L_{OE}$ 、 $L_{OF}$ 为相应的距离,此系统中 $\beta = 1 - \arcsin n_1 = 0.6^\circ$ ,当运动距离  $L_{OF}$  为1 m时,每束光光程变化约54.83 μm,但是由于不同频率的两束光变化相同,因此楔角棱镜沿z轴运动不会影响整个系统的光程差。

此系统中,两束不同频率的光路是相互平行的,因此当有x,y轴方向直线度误差或者俯仰角误差存在时,两种不同频率的光的光程变化是相同的,因此不会影响滚转角测量结果。图7为当楔形棱镜固定在旋转平台上,使其发生绕x轴转动300 μrad的角度(也就是俯仰角误差为300 μrad),系统的输出几乎不发生变化,只是由于旋转平台自身的抖动和环境影响等因素,使得系统输出存在4 μrad的抖动,所以该系统不受俯仰角的影响。

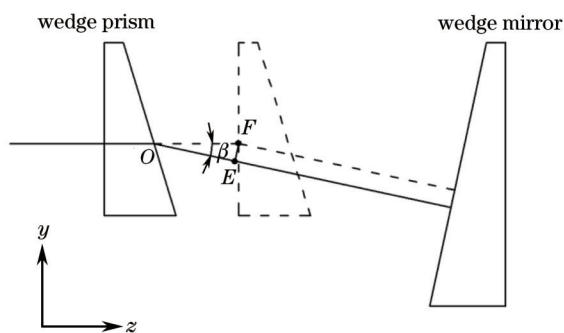


图6 楔角棱镜沿z轴运动时的光程变化

Fig.6 Optical path changes when wedge prism moving along the z-axis

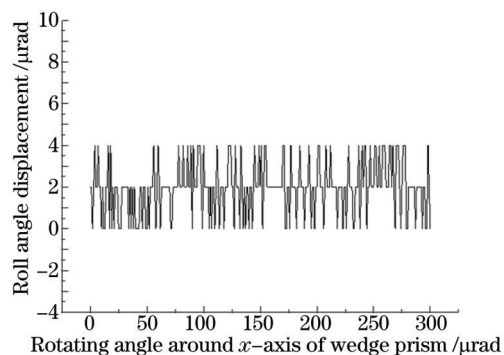


图7 楔角棱镜绕x轴旋转时的系统输出

Fig.7 Measured roll angle when wedge prism rotating around x-axis

而当存在偏摆误差时,两束不同频率的光的光程变化是不同的,如图8所示楔角棱镜沿z轴运动,如果不存在偏摆角误差,则 $f_2$ 光在楔角棱镜的入射点为 $T'$ ,当楔角棱镜绕y轴旋转η角度后, $f_2$ 光在楔角棱镜的入射

点为  $T$ 。因此由(6)式可知,不同频率的两束光光程变化之差为

$$\Delta l = 4L_{TT} \cdot (1 - \cos\beta) = 4d \sin\eta(1 - \cos\beta) \approx 4d(1 - \cos\beta) \cdot \eta. \quad (7)$$

式中  $\eta$  一般很小,因此  $\sin\eta \approx \eta$ 。针对精密机床或者一般的位移控制平台,如 Physik Instrumente GmbH 公司的微米运动平台,其俯仰和偏摆角度误差一般都控制在  $300 \mu\text{rad}$  以内,引起的相应的滚转角变化不超过  $2 \mu\text{rad}$ ,在误差允许范围之内。

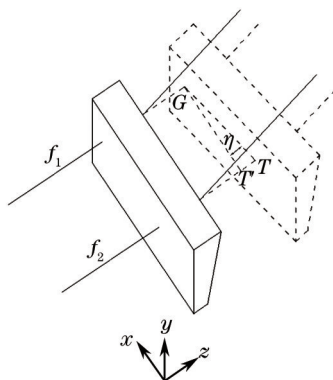


图8 楔角棱镜绕y轴旋转后光程变化

Fig.8 Optical path changes when wedge prism rotating around y-axis

## 5 结 论

综合以上理论分析和实验结果,提出的滚转角测量干涉仪系统只使用一个楔角棱镜和一个楔面反射镜配合其他光学元件即可完成滚转角的测量,因此光学系统简单,而且系统光路是对称分布的,极大地减小了死程误差的影响,系统稳定性好。如果使用更高分辨率的相位计,可以实现  $1 \mu\text{rad}$  以下的测量分辨率。此外,所设计的滚转角测量系统还可以有效地避免其他自由度误差引起的串扰。

需要指出的一点是,本系统是针对高精密度位移装置的滚转角测量系统,一般情况下  $1^\circ$  的滚转角误差已经相当大了。实验证明,此系统在  $800 \text{ mm}$  的测量行程内,测量结果与实际滚转角误差在  $\pm 2^\circ$  内都具有良好的线性关系。因此完全可以满足当今高精密度测量的需求。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Meifang, Shi Yunbo, Gao Wenhong, *et al.*. Surface roughness measurement of screen for laser projection display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108005.  
徐美芳,石云波,高文宏,等.激光投影显示屏表面粗糙度的测量[J].中国激光,2014,41(1):0108005.
- 2 Xiang Yong, Ren Jie, Bai Manshe, *et al.*. Prediction method and measurement of the depth of subsurface damage of glass-ceramic by lapping process[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0708006.  
向勇,任杰,白满社,等.微晶玻璃研磨加工亚表面损伤深度预测方法及测量[J].中国激光,2014,41(7):0708006.
- 3 Feng Jinhua, Hu Song, Li Yanli, *et al.*. Nano focusing method based on moire fringe phase analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212005.  
冯金花,胡松,李艳丽,等.基于叠栅条纹相位解析的纳米检焦方法[J].光学学报,2015,35(2):0212005.
- 4 Gao Wei, Zhang Sizhou, Satoshi Kiyono. Measurement and control of rolling of a precision moving table[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, 1997, 1: 70-74.
- 5 Ma Junshan, Wang Xiangzhao, Fang Zujie. Optical precision measurement technique of rolling error[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1403-1406.  
马军山,王向朝,方祖捷.滚转角误差的光学精密测量技术研究[J].光学学报,2000,20(10):1403-1406.
- 6 Yin Chunyong, Xie Guangping, Cheng Xiangyin, *et al.*. Measurement method of the rolling angle[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 1996, 36(10): 86-91.  
殷纯永,谢广平,成相印,等.滚转角测量方法的研究[J].清华大学学报(自然科学版),1996,36(10):86-91.
- 7 Jiang Hong, Yin Chunyong. Sensitivity enhanced roll angle measurement[J]. Opt Eng, 2000, 39(2): 516-519.

- 8 Liu Zhongyao, Lin Dejjiao, Jiang Hong, *et al.*. Roll angle interferometer by means of wave plates[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 104: 127-131.
- 9 Wu Chienming, Chuang Yitsung. Roll angular displacement measurement system with microradian accuracy[J]. Sensors Actuators A, 2004, 116: 145-149.
- 10 Richard R Baldwin, Saratoga Calif. Interferometer System for Measuring Straightness and Roll, US Patent 3790284[P]. [1974-02-05].
- 11 Hou Wenmei, Zhao Xianbin, Zhang Yunbo. Laser Interferometer System for Measuring Roll Angle, US Patent 8325348 B2[P]. [2012-12-4].
- 12 Le Yanfen, Hou Wenmei, Hu Kai, *et al.*. High-sensitivity roll-angle interferometer[J]. Opt Lett, 2013, 38(18): 3600-3603.

栏目编辑: 何卓铭