

横向调制偏振光测量导轨直线度

朱凌建^{1,2} 李照锁¹ 刘君华² 张钟华³

¹ 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048
² 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049
³ 中国计量科学研究院, 北京 100013

摘要 介绍了一种测量导轨直线度误差的新方法,利用偏振干涉原理调制出一束偏振角随光束横向坐标线性变化的特殊线偏振光光束,通过一个随直线度误差移动的光缝测量出光束中不同位置的偏振角,根据直线度误差与偏振角之间的线性关系,实现对直线度误差的测量。从理论上对该方法进行了论证分析,进而详细介绍了光学调制器的组成,设计了偏振角测量的光电组件,并进行了相应的实验。实验结果分析表明,该实验装置的直线度误差与偏振角之间的直线拟合相关指数 R^2 优于 0.9995,且测量直线度误差范围不低于 0.5 mm,构建的测量系统经标定后测量分辨力可以达到亚微米级,测量不确定度达到 $1\ \mu\text{m}$ 。该方法不仅实现方便、可靠性较高,而且可以克服测量时由于光强变化、导轨形面误差对测量结果的影响,稍加改进即可实现二维直线度误差测量,测量精度与自准直仪相当,具有一定的理论研究意义和较强的实际应用前景。

关键词 光学测量; 直线度误差; 偏振角测量; 偏振角调制

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0955

Straightness-Error Measurement with Laterally Modulated Polarized Light

Zhu Lingjian^{1,2} Li Zhaosuo¹ Liu Junhua² Zhang Zhonghua³

¹ College of Mechanical and Precision Instrument Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China
² School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
³ National Institute of Metrology of China, Beijing 100013, China

Abstract A new method of measuring guide straightness error is proposed. Based on a linear relationship between polarizing angle and lateral offset position displacement. A peculiar polarized beam, whose polarization angles are distributed linearly as lateral direction coordinates, is modulated by a designed active optical modulator based on polarization interference principle. The polarizing angles of the beam are detected by an optical detecting component and an optical slit, which move correspondingly with the existed guide straightness error. Laboratory experiments are conducted to validate the method and the results show that the correlation coefficients of the linear fitting curves between the polarizing angle and offset displacement is above 0.9995, with the standard deviation of the repeatability test within $1\ \mu\text{m}$. The range of straightness error measurement is above 0.5 mm with the resolution level at submicron grade. This method minimizes the effects caused by the variation of light intensity and guide surface error and possesses the advantages of convenience, high reliability and accuracy. After modification, it can measure two-dimensional straightness error with the same precision as the autocollimator. It can be applied to actual industrial applications.

Key words optical measurement; straightness error; polarizing-angle measurement; polarizing-angle modulation

收稿日期: 2008-05-28; 收到修改稿日期: 2008-09-19

作者简介: 朱凌建(1978—),男,博士研究生,讲师,主要从事光电智能传感器方面的研究。E-mail: zlj_zhy@xaut.edu.cn

导师简介: 刘君华(1938—),女,教授,博士生导师,主要从事智能传感器系统理论与技术等方面的研究。

E-mail: junhliu@263.net

1 引 言

导轨直线度测量在工业测量领域中占有非常重要的地位,测量方法也多种多样。激光准直测量法以其实现简便而备受青睐。大致分为三种类型^[1]: 1) 以光强分布中心作为准直基准的强度测量型。这种方法由于近来采用面阵 CCD 或 PSD 等作为位置敏感元件使精度得到了大大提高并使测量维数增加^[2,5,6,9]。但在长距离测量中,光的衍射会使光斑边缘发生形变,对测量精度产生很大影响。2) 以被测光相位变化为基准的相位测量型。这种方法主要通过测量光楔上下表面反射光产生的干涉条纹变化进行测量^[3,8]。3) 以偏振态变化为基准的偏振态检测型^[4,7]。第一种方法简单但测量精度不易把握,后两种精度高但实现繁琐,目前正被广泛关注和研究的热点。本研究室提出了上述第 3 种方法,曾设计过利用磁光效应原理将偏振光的偏振角进行调制以实现直线度测量的方法^[7],这种方法对调制器的制作工艺要求很高。为此,本文提出一种基于偏振干涉原理的偏振角调制方法,设计了偏振角测量光电组件并应用到导轨直线度误差的测量中。

2 测量原理

导轨直线度误差包括:1) 导轨在水平面内的直线度误差;2) 导轨在垂直面内的直线度误差^[4]。一般的导轨直线度误差都可看成是以上两种误差的合成。为了简便起见,本文单以检测导轨水平面内的直线度误差为例对其测量原理进行介绍。如图 1 所示,偏振角探测组件 6 安装在滑板 3 上,其前方安装有透光窄缝 5,内部安装光电探测器及其相应信号调理电路;滑板 3 在导轨 2 上沿着 y 方向前后移动;光源 1 产生一束偏振角在光束横向上(即 x 方向)被线性调制的线偏振光,该光束沿导轨 y 方向投射到光电组件 6 上形成光斑 4,光斑 4 覆盖光缝 5 的全

部区域。当导轨存在 x 方向直线度误差时,滑板 3 会带动光电组件 6 左右移动,从而使具有不同偏振角的线偏振光从光缝中透过,利用偏振角与直线度误差之间的线性函数关系,通过测量透射光线偏振角的变化便可推算出导轨的直线度误差,如图 2 所示。

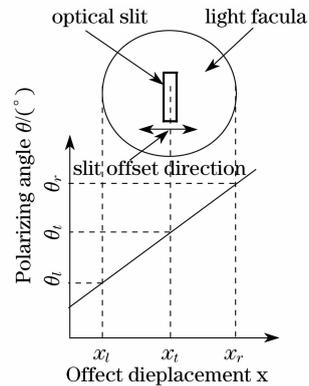


图 2 直线度误差与偏振角的线性关系

Fig. 2 Relationship between polarizing angle θ and offset displacement x

3 光源的调制

3.1 偏振光调制原理

由测量原理可知,该方法的核心是偏振角的调制和检测。偏振角的调制器结构设计如图 3(a)所示,包括直角棱镜、偏振分光镜、直角棱镜、光楔以及 $\lambda/4$ 波片。首先,建立如图 3(b)所示坐标系 $x'-y'$,由 He-Ne 激光器出射一束偏振角与 x' 为 $\pi/4$ 的线偏振光,其电矢量为 E_0 ,偏振角调制器入射光光矢量方程可表示为

$$\begin{cases} E_{y'} = E_0 \sin \frac{\pi}{4} \cdot \cos \omega t, \\ E_{x'} = E_0 \cos \frac{\pi}{4} \cdot \cos \omega t, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $E_{x'}$, $E_{y'}$ 为光矢量 E_0 在 x' , y' 上的分量。偏振光经偏振分光镜分成 p, s 两路,两束光经多次反射后汇聚到 $\lambda/4$ 波片处,当两光路在以上过程中存在附加相位差 δ 时,光矢量方程可由下式表示:

$$\begin{cases} E_s = E_0 \sin(\pi/4) \cos(\omega t + \delta), \\ E_p = E_0 \cos(\pi/4) \cos \omega t. \end{cases} \quad (2)$$

E_s , E_p 两路光汇聚到达 $\lambda/4$ 波片处时,分别在波片的快轴 u 和慢轴 v 上形成两个新分量 E_u , E_v , 如

$$\begin{aligned} E_u &= E_0 \cos(\omega t + \pi/2 + \delta) \cos(\pi/4) \cos(7\pi/4) + \\ &E_0 \cos(\omega t + \pi/2) \sin(\pi/4) \cos(\pi/4) = \\ &- E_0 \sin[\omega t + (1/2)\delta] \cos[(1/2)\delta], \end{aligned} \quad (3)$$

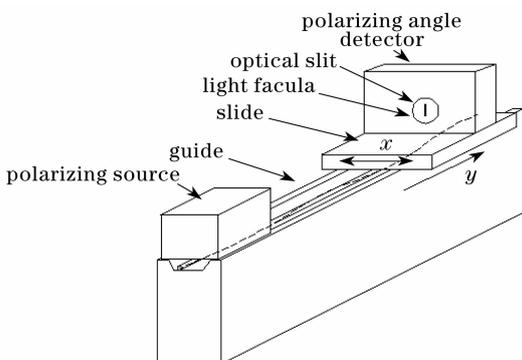


图 1 直线度误差的测量原理

Fig. 1 Schematic of straightness-error measurement

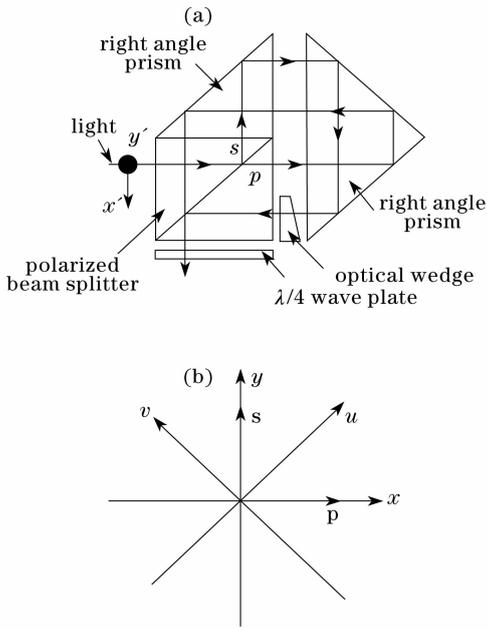


图3 偏振角调制器调制原理图

Fig. 3 Layout of the optical polarizing angle modulator

$$E_v = E_0 \cos(\omega t + \delta) \sin(\pi/4) \cos(7\pi/4) + E_0 \cos \omega t \cos(\pi/4) \cos(5\pi/4) = -E_0 \sin[\omega t + (1/2)\delta] \sin[(1/2)\delta], \quad (4)$$

且二者经过 $\lambda/4$ 波片产生 $\pi/4$ 相位差。

E_u, E_v 两方程间存在如下关系:

$$E_v/E_u = \tan[(1/2)\delta]. \quad (5)$$

可以看出,经调制器调制的最终出射光仍为线偏振光,且偏振角 θ :

$$\theta = \delta/2. \quad (6)$$

由(6)式可知,偏振光的偏振角与引入的附加相位差成正比,只要 δ 在光束横向上呈线性分布,便可得到测量原理中所需要的偏振角呈线性分布的调制偏振光束。

3.2 线性相位差的引入

根据几何关系及直角棱镜的性质, p, s 两光路在光学调制器中所走的光程相等。因此,两者间线性分布的相位差可以通过使其中一条光路的折射率呈线性分布的方法来实现。具体方法是在 s 光路中加入一个光楔,由于光楔倾角很小,认为光经过光楔后仍按原路径传播。如图4所示,设光楔倾角为 φ , 折射率为 n , 上边长为 a , 距光楔上边沿为 x 的光线垂直射入光楔后,产生的附加相位差 δ 为

$$\delta = \pi/\lambda \cdot (l'_s - l_p) = \pi/\lambda \cdot [l_s - l_p + (n-1)(a + x \tan \varphi)] = (\pi/\lambda)(n-1)(a + x \tan \varphi). \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中得

$$\theta = \pi/(2\lambda)(n-1)(a + x \cdot \tan \varphi) \quad (8)$$

对式(8)做变换得

$$\Delta\theta = \pi/(2\lambda)(n-1) \cdot \tan \varphi \cdot \Delta x. \quad (9)$$

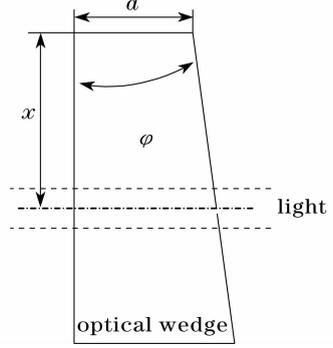


图4 光楔结构

Fig. 4 Optical wedge structure

由式(9)可知,当光楔一定,即 φ, n, a 一定时,某一光线最后所得的偏振角为横向坐标 x 的一次函数,而对于一条包含有大量光线的光束来讲,其偏振角便实现横向上呈线性分布的特点,实现偏振光的横向线性调制。值得注意的是,光楔倾角的选择需考虑光斑的大小和使用的激光器波长,实验中楔角在 $0.1''$ 数量级,一般的光楔是难以满足要求的。而平行玻璃板在实际的加工过程中存在着形面误差,实验证明,其形成局部光楔正好可以满足原理中光楔角的要求,所以我们用平行玻璃板代替光楔。

4 偏振角的测量

当偏振角发生变化时, p, s 分量一个变大,一个变小,被测光信号可看成变化缓慢的光强信号。光学结构如图5所示,先由分光镜(BS)将被测光分成两路,其中一路由偏振分光镜 PBS_2 分成 p, s 两路,直接由光电探测器 D_3, D_4 进行光强检测。另一路经过半波片 P_1 后由偏振分光镜 PBS_1 分成两路后由光电探测器 D_1, D_2 进行光强检测。半波片 P_1 的作用是调节偏振角 θ 与另一路相差 $\pi/4$ 。四个探测器所得信号的方程组如下所示:

$$\begin{cases} I_{D1} = I \cos^2 \theta \\ I_{D2} = I \sin^2 \theta \\ I_{D3} = I \sin^2(\theta + 5\pi/4) \\ I_{D4} = I \cos^2(\theta + \pi/4) \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)中 I 为原始光强。对上述四路信号做如下数学处理可得

$$\frac{I_{D3} - I_{D4}}{I_{D1} - I_{D2}} = \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \tan 2\theta \quad (11)$$

由式(11)可知,经过反正切运算后便可得偏振角 θ 大小。该方法的优点是可以消除光强变化对测量的影响,整个装置为纯光学结构,可靠性高。

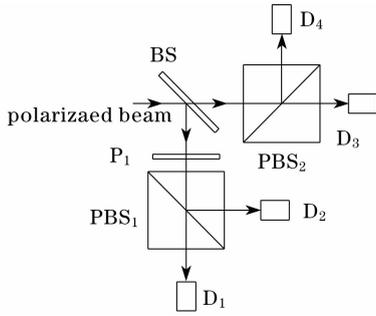


图 5 偏振角测量部件图

Fig. 5 Layout of polarizing angle measurement detector

5 实 验

由(9)式、(11)式可知,通过测量透射光线偏振角的变化便可推算出导轨的直线度误差。本文在调制光源距光电探测组件位移为 1 m 的情况下,对上述方法作了实验验证分析。

5.1 偏振角与直线度误差的线性实验

通过对光缝给定一组标准偏移量 Δx ,由构建的实验系统测量得到相对应的偏振角角度值 θ ,进行对比,进而对整个方法进行评估。经过多次实验,利用直线拟合法,拟合后的曲线如图 6 所示。

表 1 灵敏度实验的实验数据/ μm

Table 1 Experimental data of the resolution test/ μm

Serial number		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
Given standard offset displacement	Δx	0.5	1	2	3	5	10
First group measured value	x_1	0.64	1.18	2.05	2.91	5.14	10.05
Second group measured value	x_2	0.49	0.95	2.09	3.03	5.06	9.94
Third group measured value	x_3	0.39	1.07	1.88	3.11	4.92	10.13
Maximum measuring error		0.25	0.23	0.21	0.20	0.22	0.19

由表 1 知,该方法直线度误差的测量分辨力可达到亚微米级,达到同类功能测量仪器的分辨力,且测量最大误差为 0.25 μm 。

5.3 重复性实验

将上述装置放在实验室 5 米测长机上,任选其

表 2 直线度重复性测量实验的数据

Table 2 Experimental results of the straightness repeatability test

Position /mm	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	$\delta - / \mu\text{m}$
Group 1 / μm	0	-0.7	-1.0	-1.4	-1.7	-1.9	-1.3	-1.7	-1.4	-1.2	-1.6	1.34
Group 2 / μm	0	-1.4	-1.7	-1.8	-2.1	-2.2	-1.9	-2.1	-1.8	-1.6	-1.8	1.40
Group 3 / μm	0	-0.7	-0.9	-1.0	-1.3	-1.5	-1.0	-1.4	-1.1	-1.0	-1.2	0.98
Group 4 / μm	0	-0.9	-1.2	-1.5	-1.6	-1.7	-1.2	-1.7	-1.7	-1.4	-1.7	1.37
Group 5 / μm	0	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-0.9	-1.1	-0.8	-0.6	-0.8	0.92
Group 6 / μm	0	-1.0	-1.4	-1.6	-1.9	-2.0	-1.5	-1.8	-1.0	-0.8	-0.9	1.56
Standard deviation / μm		0.31	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.31	0.36	0.34	0.39	Average
System uncertainty(K=1)				0.34								
System uncertainty(K=3)										1.02		1.26

多次实验所得的拟合曲线中拟合系数 R^2 可达到 0.9995,说明两者的线性关系很好,从而验证了(9)式的理论正确性,同时也可以看出该方法的测量范围可以达到 0.5 mm。

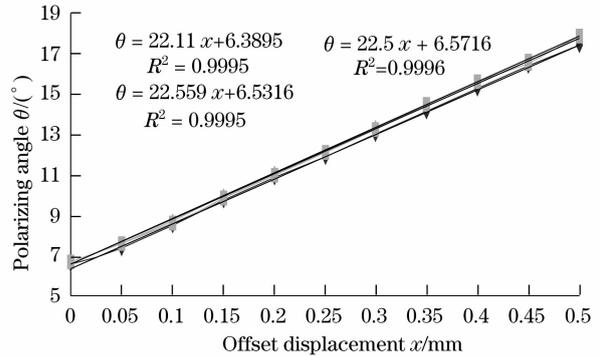


图 6 偏振角与直线度误差的实验拟合曲线

Fig. 6 Experimental data curves of polarizing angle with straightness error

5.2 灵敏度实验

采用 5.1 的方法,通过对光缝给定一组标准偏移量 Δx ,由构建的实验系统经过标定后,测量得到相对应的直线度值 x_i , i 为测量次数。经过多次实验,获得其中 3 次的实验数据如表 1 所示。

中的 1 m 导轨,对其直线度误差进行了重复性实验,实验中控制测长机以间隔 100 mm 运动,其中 6 次测量的数据如表 2 所示。

该测量系统不确定度(K=1)为 $\sigma = 0.34 \mu\text{m}$,不确定度(K=3)为 $3\sigma = 1.02 \mu\text{m}$ 。实验结果具有

较高的重复性,系统测量可靠。用该方法测量得到该段导轨的直线度误差 $\bar{\delta}$ 为 $1.26 \mu\text{m}$,而采用自准直仪测量结果为 $1.15 \mu\text{m}$,该方法与自准直仪具有相当的测量精度。

6 结 论

本文利用偏振干涉原理设计了一种导轨直线度测量方法,对直线度误差的测量做了新的尝试,为导轨直线度误差实时高精度数字化检测提供了一条新途径。实验结果分析表明,该实验装置的直线度误差与偏振角之间的直线拟合相关指数 R^2 优于 0.9995 ,测量范围可达 0.5 mm ,构建的测量系统经标定后测量分辨力可以达到亚微米级,系统的测量不确定度可达 $1 \mu\text{m}$ 。该方法不仅克服了常规仪器测量直线度受测量光强变化的影响,而且还对导轨形面误差不敏感,整套装置实现方便、可靠性较高,稍加改进即可实现二维直线度误差测量,具有一定的理论研究意义和较强的实际应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yuan Jiang, Qiu Zixue, Shao Jianxin. Automatic measuring system of alignment error based on laser collimator technique[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006, **11**: 59~62
袁江,邱自学,邵建新. 基于激光准直的直线度误差自动测量系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2006, **11**: 59~62
- 2 Cao Yiping, Liu Mingjian, Liu Xiaoli *et al.*. Development of an instrument for measuring large range 2-D straightness[J]. *Optic Electric Engineering*, 2004, **31**(9): 57~60
曹益平,刘明健,刘晓丽等. 大尺度二维直线度测量仪的研制[J]. *光电工程*, 2004, **31**(9): 57~60
- 3 Pei Zhongfang, Lin Yuchi, Zhao Meirong. Research on laser interference alignment[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 203~205
裴中方,林玉池,赵美蓉. 激光干涉准直技术的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(4): 203~205
- 4 Xie Jinghui. *Physical Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006
谢敬辉. *物理光学教程* [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006
- 5 P. B. Dhanish, Jose Mathew. A fast and simple algorithm for evaluation of minimum zone straightness error from coordinate data[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **32**(1): 92~98
- 6 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Analyzing characteristic of the cube-corner retro reflector applied to laser straightness measurement[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 282~285
匡萃方,冯其波,刘斌. 角锥棱镜用于激光直线度测量的特性分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(2): 282~285
- 7 Wang Quanbao. *A Study of Linearity Measurement Method Based on Magneto-Optic Linear Modulation* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006
王全保. 磁光旋向横向线性调制测量直线度方法的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2006
- 8 Zhao Bin. Instrument for straightness measurement using non-diffracting beam and moiré fringe [J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(1): 75~77
赵斌. 无衍射光莫尔条纹法直线度测量仪[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(1): 75~77
- 9 Zhang Pengwei, Zhang Zhiquan, Xie Jinbing. Study on a straightness measurement method based on the four-quadrant detector for deep hole[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 745~747
张鹏伟,张智诠,谢劲冰. 一种基于四象限探测器的深孔直线度测量方法的研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 745~747