

光学超外差法小平面对角精密测量

林 跃 周志尧 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

文本用纵向塞曼双频稳频激光器作光源,提出了一种光学超外差法小平面对角的精密测量方法。此方法采用相位干涉测量技术,测角灵敏度可达 $0.002''$,优于其他平面角测量仪的测角灵敏度。

关键词:超外差的;平面角;光电检测器。

一、引 言

高精度光学零件角度的加工和检测,是光学加工和检测领域中的一个重要课题,而平面度和位置偏差对光学零件加工的性能,具有决定性的影响。目前,国内小平面对角仪的测角灵敏度只在 $0.1''$ ^[1],国外小平面对角仪的测角灵敏度为 $0.01''$,且高精度测角仪的计算复杂。同时,在角度测量技术中,测角仪^[2~4]本身就存在着一定的测量不确定度(如坐标测定的倾斜,光学角规中作为标准角的偏向角精度等),因而有必要通过校准,定量地确定测角仪的测量不确定度的大小,即需要这样的装置,它们的测量不确定度小于被测装置的测量不确定度。常用的测量装置有光电自动准直仪和电倾斜计^[5~6]。本文利用光学超外差法干涉测量,测量的不确定度更小,有更显著的效果。

光学超外差法是用频率稍有区别的两束光产生差拍信号,然后用光电检测器接收。由于光电检测器的输出与入射光强成正比,即与光波电场的平方成正比,因此,两束频率不同的光波在检测器上相干迭加产生了包含差频的输出,即检测器把两束光的差拍信号位相变为电信号位相,然后用电学方法测量其位相变化。

本文选用双频激光器作光源,系统采用分偏振法干涉结构^[7]和相位干涉测量技术,测量光学零件的平面度。此方法与其他平面角测角仪相比,具有结构紧凑、测量方便、灵敏度高等特点。

二、实验原理

系统的实验原理如图1所示。由纵向塞曼双频稳频激光器(Z)输出两束频率分别为 f_+ 、 f_- 的左、右旋圆偏振光的共程光束,经 $1/4$ 波片(W)后,变成两束互相垂的共程直线偏振光束^[8]经分束器(B.S.)分成二束。一束照射到偏振轴与两线偏振光互成 45° 的偏振器(P_1),两线偏振光发生干涉,由光电检测器(R_1)接收。它与入射光强成正比,则检测器产生

了包含差频信号的输出,因此在示波器(O)上得到一个经放大器(A)放大的差频信号,作为

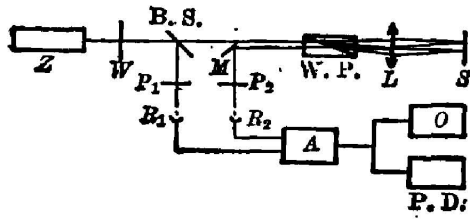


Fig. 1 Schematic diagram of the principle of the experiment

系统的参考信号。另一光束为测量光束,照射到渥拉斯顿棱镜上^[9],分成两束频率分别为 f_+ 、 f_- ,互相垂直的线偏振光束,由透镜(L)聚焦在被测物(S)上两点。两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后,重新组合成一束与入射光平行的两线偏振光的共程光束。经平面镜(M)反射到偏振轴与两线偏振光互成 45° 的偏振器(P_2)上,发生干涉,由光电检测器(R_2)接收,则在示波器上得到一个

包含被测物平面度信息的差频信号,比较测量信号和参考信号的相位差值 ϕ ,以两反射点间的距离,由相应的计算公式,即可得出被测平面角。

由于选用纵向塞曼双频稳频激光器作光源,则光电检测器(R_1)、(R_2)上的光场都可表示为^[10]:

$$E = E_+ + E_- = \exp[i(k_+Z_+ - \omega_+t)] + \exp[i(k_-Z_- - \omega_-t)], \quad (1)$$

式中 k 为波数, ω 为角频率, Z 为光程。“-”和“+”表示左、右旋圆偏振光。由于光电检测器接收到的光强信号 $I \propto |E|^2$,则比较测量信号和参考信号,即可得出它们的相位差 ϕ :

$$\phi = (k_+ - k_-)(Z_m - Z_r) + (k_+ + k_-) \frac{1}{2} l, \quad (2)$$

其中 Z_m 、 Z_r 是测量光束和参考光束的平均光程, l 是测量光束中左、右旋圆偏振光的光程差。由于

$$\begin{aligned} k_+ - k_- &= \frac{2\pi}{c} (f_+ - f_-) = \frac{2\pi}{c} f', \\ (k_+ + k_-)/2 &= \frac{\pi}{c} (f_+ + f_-) = \frac{2\pi}{c} f_0, \\ Z_m - Z_r &= l' \end{aligned}$$

(其中 f_0 是激光原子谱线的中心频率, l' 是测量光束和参考光束的平均光程之差),则:

$$\phi = \frac{2\pi}{c} (f'l' + f_0l). \quad (3)$$

测量光束与参考光束的相位差变化 $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c} (\Delta f'l' + f'\Delta l' + \Delta f_0l + f_0\Delta l). \quad (4)$$

对频差为 10^6 Hz量级的塞曼稳频激光器, $\Delta f' < 10^3$ Hz, f_0 为 10^{14} Hz量级, $\Delta f_0 < 10^6$ Hz^[10~13]。在测量中, $l' < 1$ m, $\Delta l' < 10^{-3}$ m, $l < 10^{-3}$ m很容易实现,因此,在 Δl 大于 \AA 量级的测量中,(4)式中的 $\Delta f'l'$, $f'\Delta l'$, $\Delta f_0l \ll f_0\Delta l$,即 $f_0\Delta l$ 对 $\Delta\phi$ 的影响,远远大于其他三项,则(4)式可写为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c} f_0\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l, \quad (5)$$

式中 λ 为激光中心波长。

实验干涉光路如图2(为分析方便,令此时的被测平面角 θ 为零),入射光束经渥拉斯顿棱镜后,分成光束1、光束2,由透镜聚焦在被测物上二点。当入射光束在渥拉斯顿棱镜中的

分束点,不在透镜的后焦面上时,光束 1 和光束 2 在被测物上的两反射光束,经透镜和渥拉斯顿棱镜后,虽互相平行,但不完全重合。由几何光学原理可得它们的间距为:

$$x = 2(h-f)(\operatorname{tg} \alpha_+ + \operatorname{tg} \alpha_-), \quad (6)$$

式中 f 为透镜焦距, h 为入射光束的分束点到透镜的距离, α_+ 、 α_- 分别为两偏振光的分束角。由(6)式可知, h 和 f 的差值越大, x 就越大,即两反射光束越不重合。当 h 和 f 的差值足够大时,两反射光束则完全分开。光电检测器不能同时接受到两偏振光束,因而亦无测量信号输出。因此,在测量时,应使入射光束的分束点处在透镜后焦面上,即 $h=f$, 使两反射光束尽可能重合,减小测量误差。

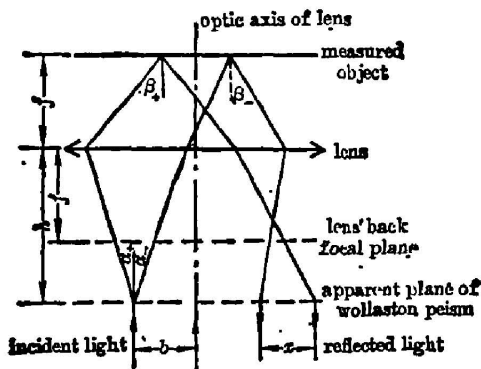


Fig. 2 Beam path geometry in the interferometer when h isn't equal to f

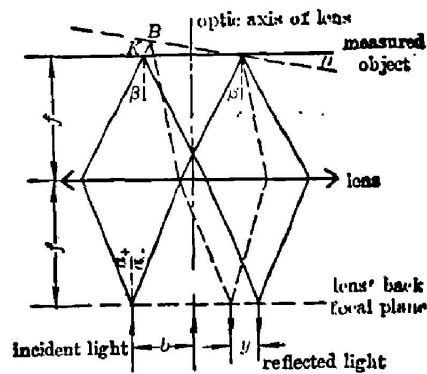


Fig. 3 Beam path geometry in the interferometer when h is equal to f

当 $h=f$ 时,由几何光学原理可得:

$$\operatorname{tg} \beta_+ = \operatorname{tg} \beta_- = \operatorname{tg} \beta = b/f,$$

式中 b 为入射光束中心到透镜光轴的距离, β_+ 、 β_- 为光束 1、光束 2 在被测物上的入射角。此时,入射光束和反射光束相对于透镜光轴完全对称,则入射光束和反射光束的间距为 $2b$ 。

当入射光束在渥拉斯顿棱镜中的分束点处于透镜后焦面上,即 $h=f$ (如图 3), 在 BK 小于透镜焦深情况下,由几何光学原理可得[附录二],光束 1'、光束 2' 和光束 1、光束 2 的光程差之差为:

$$\Delta l = d \sin 2\theta / \cos(\beta - 2\theta), \quad (7)$$

式中 d 为被测物上两光点间的间距:

$$d = f(\operatorname{tg} \alpha_+ + \operatorname{tg} \alpha_-).$$

由于 θ 很小, $\theta \ll \beta$, 则(7)式:

$$\Delta l = 2d\theta / \cos \beta. \quad (8)$$

当渥拉斯顿棱镜的分束角 $\alpha < 10^\circ$ 时,有关系 $|\alpha_+ - \alpha_-| \ll \alpha_+$ 、 α_- ^[9], 则令 $\alpha = \alpha_+ = \alpha_-$, 由(5)式和(8)式得:

$$\theta = \lambda / 8\pi f \operatorname{tg} \alpha \Delta \phi \quad (b \ll f), \quad (9)$$

$$d = 2f \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

由(9)式可得: 由于被测平面角 θ 与透镜焦距、渥拉斯顿棱镜分束角的正切成反比, 则 f 、 α 越大, $\Delta \phi$ 随被测平面角 θ 的变化就越大, 即系统的测角精度越高。系统的测角灵敏度为

$$\delta \theta = \lambda / 8\pi f \operatorname{tg} \alpha \delta(\Delta \phi), \quad (11)$$

式中 $\delta(\Delta\phi)$ 是相位测量系统的测相灵敏度。当相位测量系统选用测相灵敏度为 0.1° 的数字相位计, d 为 10 mm, 则系统的测角灵敏度可达 $0.0018''$ 。

在测量光路中, 由于 θ 值的存在使反射光束相对于 $\theta=0$ 时的反射光束在渥拉斯顿棱镜表面上有一个平移量 y 。由几何光学原理可得:

$$y = 2\theta(b^2 + f^2)/f。$$

由于 θ 很小, 实验透镜焦距为几十厘米, 因此, y 平移量相对于 b 只是一个小量。

值得注意的是, 在测量中入射光束和反射光束的中心距离 $2b$ 应尽可能小。 b 越小, 两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后, 重合得越好, 系统误差越小。但 b 不能为零。否则, 反射光束返射入激光腔, 会引起激光腔衰减, 导致激光频率不稳定。另外系统应置于封闭罩中, 且在良好的防震台上进行测量, 减小气流、震动对实验测量精度的影响。

三、实验结果和分析

实验原理如图 1。实验选用塞曼双频稳频 He-Ne 激光器, 输出光波长为 6328 \AA , 频差为 1.64 MHz, 频差稳定度优于 1.3×10^{-4} , 实验选用光电二极管作光电探测器, 用双踪示波器监视参考信号和测量信号。用测相灵敏度为 0.1° 的 BX-23 型高频数字相位计测量系统的相位变化。

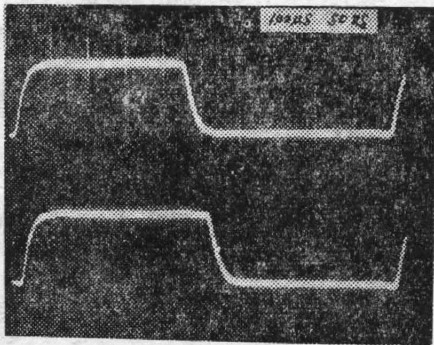


Fig. 4 Difference of the phase between the reference signal wave and the measuring signal wave is 0

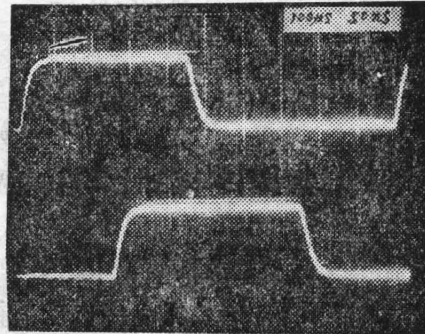


Fig. 5 Difference of the phase between the reference signal wave and the measuring signal wave is $\frac{\pi}{2}$

图 4、图 5 清楚地表明了被测平面角 θ 变化, 引起测量信号和参考信号相位差的 $\pi/2$ 变化。

图 6, 图 7 描绘了在渥拉斯顿棱镜的分束角 α 和透镜焦距 f 变化时, 实验和理论的 $\theta \sim \Delta\phi$ 关系。由图可得, 实验结果与理论计算相符合。当渥拉斯顿棱镜的分束角 α 和透镜焦距增大时, $\Delta\theta$ 变化引起的 $\Delta\phi$ 变化量也相应增大, 呈线性关系, 即系统的测角灵敏度变大。同时, 由实验可得, 系统的测角范围, 随透镜焦距 f 的增大而增大, 随渥拉斯顿棱镜分束角的增大而减小。因此, 选择不同焦距的透镜和不同分束角的渥拉斯顿棱镜, 即可得到不同的测角灵敏度和测角范围。

在系统精密测量平面角中, 气流对测角灵敏度的影响较大。当光束的分束点稍稍偏离

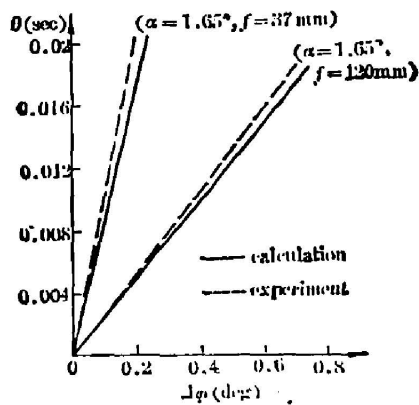


Fig. 6 Comparison of the experimental and theoretical results of the measured angle θ with the different focal length of the lens f

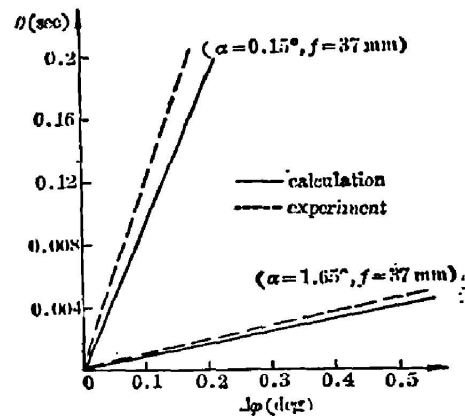


Fig. 7 Comparison of the experimental and theoretical results of the measured angle θ with the different divergence angle of the Wollaston prism

Table 1 Comparison of the experimental and theoretical results of the angle-measuring sensitivity

$\alpha(\text{deg.})f(\text{mm})$	$\delta\theta(\text{sec})$	
	theoretical	experimental
$\alpha=0.15 \quad f=120$	0.029	0.031
$\alpha=0.15 \quad f=37$	0.093	0.109
$\alpha=1.65 \quad f=120$	0.0026	0.0028
$\alpha=1.65 \quad f=37$	0.0085	0.0104

透镜的后焦面(如图2),则两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后,将不完全重合。因此气流对它们各自光程的影响就增大,导致它们的光程差不断地随气流影响而变化,表现为测量信号的持续抖动。另外,入射光束和反射光束的中心距离 $2b$ 应尽可能小,使两反射光束在渥拉斯顿棱镜中的共光束点与入射光束的分光束点尽可能接近,则两反射光束经渥拉斯顿棱镜后能较好重合,从而减小误差,提高系统的测角灵敏度。同时,由于系统测量参考信号和测量信号相位差的精度很高,工作台的震动也会引起一定的信号抖动,影响测角精度。

四、结 论

理论分析和实验结果表明,光学超外差分偏振干涉测量平面角方法,是一种高精度的测角方法,其测角灵敏度可达 $0.0018''$ 。因此,此方法不仅可用来检测高精度光学零件的平面角,而且能测量其他测角仪的测量不确定度,校准角度标准等。此方法与其他测角仪相比,具有结构紧凑,计算方便的特点。

参 考 文 献

- [1] 私人通讯。
- [2] P. Hoffmann *et al.*; *Foingertechnik*, 1984, No. 1 (Jan), 18~20.
- [3] W. Beyer; *Measurement*, 1984, 2, No. 1 (Jan-Mar), 14~17.
- [4] 私人通讯。
- [5] R. Jablanski, A. Toyama; *Bull. PME(TLT)*, 1979, 43, No. 1 (Jan), 29~33.
- [6] B. Schatz; *Bull. BNM*, 1979, 43, No. 1 (Jan), 52~58.
- [7] 叶声华;《激光在精密计量中的应用》, (机械工业出版社, 1980), 84。
- [8] 私人通讯。
- [9] 梁铨廷;《物理光学》, (机械工业出版社, 1980), 211。
- [10] *ibid.*, 288~289.
- [11] 私人通讯。
- [12] 郭继华;《清华北大理工学报》, 1975, 2, No. 4 (Apr), 53~62。
- [13] 中国计量院激光组;《物理》, 1973, 2, No. 1 (Feb), 35~39。

Precise opto-heterodyne measurement of small plane angle

LIN YAO, ZHOU ZHIYAO AND WANG PENWEN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 16 February 1987; revised 10 April 1987)

Abstract

This paper discussed an opto-heterodyne technique for small-plane-angle measurement with a frequency-stabilized longitudinal Zeeman laser as the light source. It employs the phase measuring interferometric technique. Its angle-measuring sensitivity can reach 0.002", exceeding that of the other plane-angle-measuring techniques.

Key words: heterodyne; plane angle; photodetector.