

一种测量滚转角的新方法*

蒋 弘 殷纯永

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

提要 提出了一种基于横向塞曼激光器的滚转角测量系统,实现了大范围、高精度的滚转角测量。系统利用四分之一波片将横向塞曼激光器射出的正交线偏振光轻微椭圆偏化,检偏器作为滚转角传感器跟随被测件转动,再用光电探测器检测出射光的相位变化,得到检偏器的滚转角变化。这时相位变化与转角成非线性关系,在特定的角度上出现测量转角的灵敏度倍增区。采用这种方法,可以实现大范围的滚转角测量,并且在特定的角度上得到很高的灵敏度。使用分辨率为 0.01° 的相位计,滚转角的测量分辨率达到 0.00018° 。

关键词 灵敏度倍增,横向塞曼激光器,滚转角

1 引 言

在机床或三坐标测量机等系统中经常使用双频干涉仪进行长度测量。为了实时地修正长度测量中的阿贝误差,需要同时对长度、偏转角、俯仰角和滚转角进行测量^[1]。其中滚转角是最难于测量的一个。另外,在某些工件的安装和标准中,也需要对滚转角进行测量或定位。因此,有必要研究一种具有高灵敏度、大测量范围和高稳定性的滚转角测量方法。

众所周知,把四分之一波片 45° 放置,可将频率分别为 ω_1, ω_2 的正交的线偏振光转变成为正交圆偏振光。用检偏器进行合光后,合成光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\Psi] \quad (1)$$

式中 $\Delta\Psi$ 为拍频信号的附加相位变化,是检偏器转角 α 的函数。分析不难得到

$$\Delta\Psi = 2\alpha \quad (2)$$

两者完全呈线性关系。采用这种测量方法,可以追溯到 1974 年,前苏联 B П 考伦凯维奇等^[2]报道:采用低频差纵向塞曼激光器,用旋转检偏器的方法实现滚转角的测量,使用分辨率为 0.003° 的相位计,得到的测相精度为 0.01° ,相应的机械转角精度为 0.005° ,整圆周测量时相位非线性度为 2° 。其作者认为测量的不确定度很难降到 $0.0028^\circ (10^{-3})$ 以下。

本文提出并建立了一种基于横向塞曼激光器的测量系统,通过四分之一波片的位置变化实现滚转角的线性和非线性测量。非线性测量的优点是:在特定的角度,测量的灵敏度倍增,可以在足够大的角度范围内得到非常高的角分辨率和线性度。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59735120)。

2 原 理

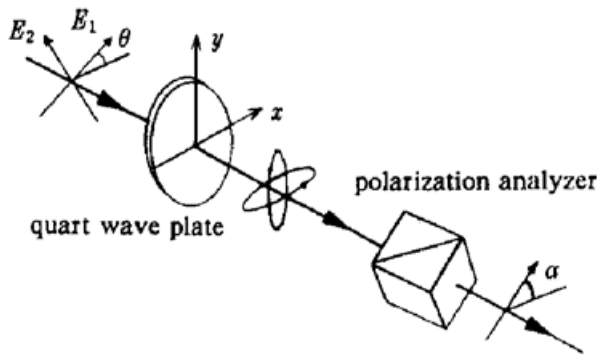


图 1 光路原理

Fig. 1 Principle of roll angle measuring

我们注意到式(2)中两个角度之间存在系数为2的倍乘关系,只要能提高这一系数,就可以用同等精度的相位计达到更高的测量精度。通过设置四分之一波片和入射光的偏振方向的夹角,可以做到这一点。其光路原理见图1,入射光为正交线偏振光,振幅分别为 E_1 和 E_2 ,圆频率分别为 ω_1 和 ω_2 ,先后通过四分之一波片和检偏器。为了计算方便,设 x 轴为四分之一波片的快轴方向,则 E_1 与 x 轴夹角为 θ ,检偏器的检偏方向与 x 轴夹角为 α 。

出射光的琼斯矩阵为

$$E = P(\alpha)QR(\theta)E_0 \quad (3)$$

式中入射光矢量 $E_0 = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \exp[-i(\omega_1 t + \varphi_1)] \\ A_2 \exp[-i(\omega_2 t + \varphi_2)] \end{bmatrix}$, 旋转矩阵 $R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$, 四分之一波片 $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$, 检偏器 $P(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin\alpha\cos\alpha \\ \sin\alpha\cos\alpha & \sin^2\alpha \end{bmatrix}$ 。可得

$$E = [(\cos\theta\cos\alpha - i\sin\theta\sin\alpha)E_1 + (\sin\theta\cos\alpha + i\cos\theta\sin\alpha)E_2] \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} = \\ \{k_1 A_1 \exp[-i(\omega_1 t + \varphi_1 + \arctan(\tan\theta \cdot \tan\alpha))] + \\ k_2 A_2 \exp[-i(\omega_2 t + \varphi_2 - \arctan(\cot\theta \cdot \tan\alpha))]\} \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $k_1 = \sqrt{\cos^2\theta\cos^2\alpha + \sin^2\theta\sin^2\alpha}$, $k_2 = \sqrt{\sin^2\theta\cos^2\alpha + \cos^2\theta\sin^2\alpha}$ 。

从上式可以看出,两个频率分量的光除了其振幅改变之外,还分别产生了不同的相位变化。根据(4)式进一步计算得到合成的光强 I 为

$$I = |E|^2 = k_1^2 A_1^2 + k_2^2 A_2^2 + 2k_1 k_2 A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\Psi] \quad (5)$$

式中最后一项即为探测到的拍频信号,包含了附加相位差 $\Delta\Psi$,

$$\Delta\Psi = \arctan(\tan\theta \cdot \tan\alpha) + \arctan(\cot\theta \cdot \tan\alpha) \quad (6)$$

(6)式给出了一一般情况下拍频信号的相移 $\Delta\Psi$ 对检偏器转角 α 的依赖关系。图2给出了几组不同的 θ 角下两者的关系曲线。在这里,我们关心的是:在什么条件下 $\Delta\Psi$ 对 α 的变化最敏感,即什么时候 $\Delta\Psi$ 对 α 的导数最大。为讨论方便,定义角度放大率 K_a 为

$$K_a = \frac{d(\Delta\Psi)}{d\alpha} \quad (7)$$

仔细分析(6)式,我们看到,在 $\alpha = 0$ 附近时,从(6),(7)式可近似为

$$\Delta\Psi = (\tan\theta + \cot\theta)\alpha \quad (8)$$

$$K_a = \tan\theta + \cot\theta \quad (9)$$

显然,当 $\theta = 45^\circ$ 时, $K_a = 2$, (8)式退化为(2)式,这时即为引言中提到的线性测量。否则,为非线性测量,在特定的角度位置上,会出现 $K_a > 2$ 的情形。当 $\theta \ll 1$, $\alpha = 0$ 时,有 $K_a \gg 2$,此时 $\Delta\Psi$ 对 α 的变化极为敏感,出现了一个测量滚转角的灵敏区域, θ 越小,灵敏度越高(当 θ 恰好等于 0 时 $K_a = \infty$,但此时拍频信号的交流幅值为零,无法测量)。在此区域中测量滚转角,相

位角变化为滚转角的 K_a 倍。同理, 当 $\theta \ll 1, \alpha = 90^\circ, 180^\circ, \dots$ 时, 同样将出现测量灵敏区, 见图 2。 $\theta \neq 45^\circ$ 时, 在全部角度范围内, 相位变化和滚转角呈非线性关系, 曲线斜率最大的部分即为测量灵敏区。

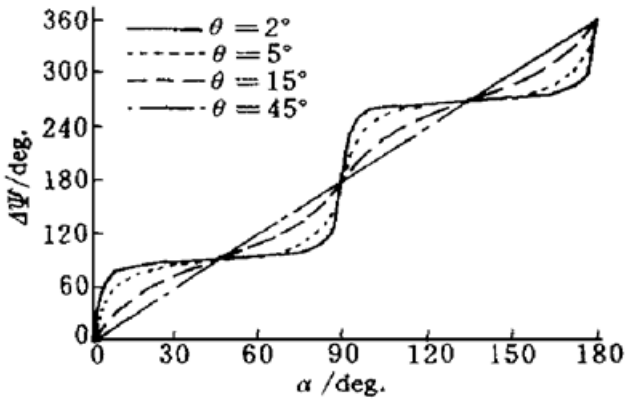


图 2 $\Delta\Psi$ 与 α 的关系理论曲线

Fig. 2 Theoretical phase change vs the roll angle

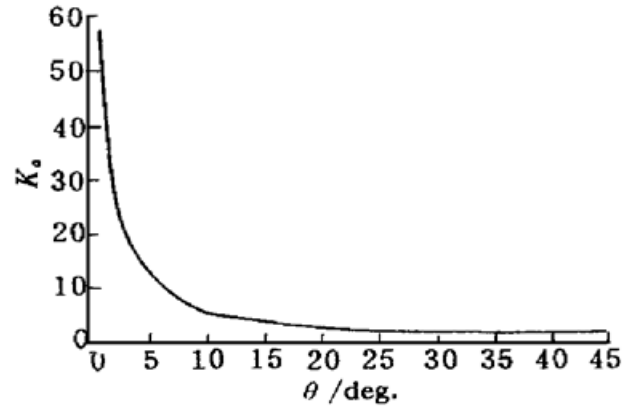


图 3 K_a 与 θ 的关系理论曲线($\alpha = 0$)

Fig. 3 Theoretical angle amplifier vs θ

3 实 验

为实现上述设想, 建立如图 4 所示的实验装置。其中横向塞曼激光器为本实验室研制的 SJD-5 型, 稳频精度为 4×10^{-10} , 频差为 332 kHz。相位计分辨率为 0.01° 。四分之一波片固定在一个分辨率为 $0.0028'' (10')$ 的分度头上, 以便精确测定波片的安装角度; 检偏器为泰勒-格兰棱镜, 用另外一个分度头测定其转角。

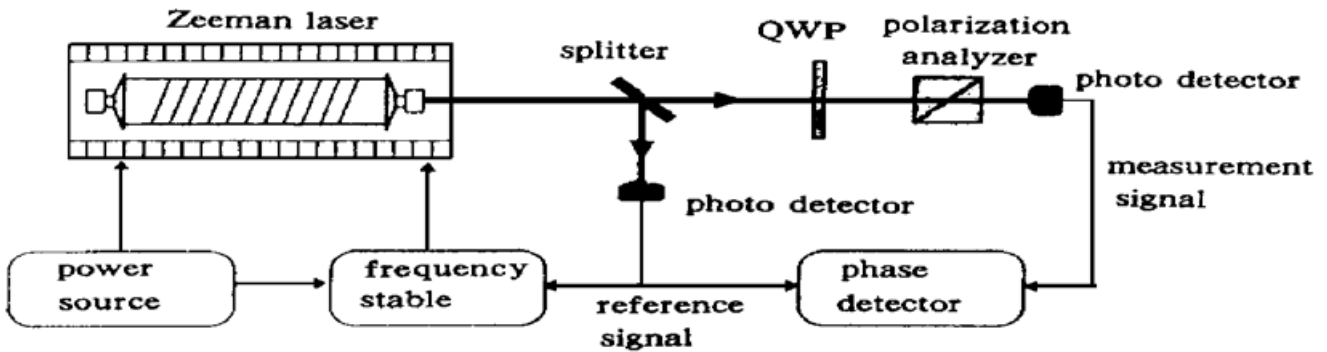


图 4 实验装置

Fig. 4 Schematic of the experimental setup (QWP: quart wave plate)

本系统中之所以选用横向塞曼激光器作为光源, 是因为它的输出直接就是正交性非常优异的线偏振光, 无需其他光学元件, 减少了误差来源, 比用纵向塞曼激光器或声光调制优越得多。另外, 它的拍频频率较低, 有利于信号处理和提高比相精度。

图 5~ 7 给出了实验结果。图 5 为不同的四分之一波片安装角度下测得的曲线, 与图 2 相比, 实验和理论符合得很好。从图上可以很清楚地看到, θ 较小时, 在特定的 α 角度上出现了测量灵敏区。图 6 为测量灵敏区附近的局部放大图, 它显示出在测量灵敏区内 $\Delta\Psi$ 和 α 存在很好的线性关系, 相关系数 $r = 0.99996$, 比例系数 $K_a = 56.74$ 。使用内插法可以得到: 在 0.5° 的测量范围内, 滚转角的测量分辨率为 $\delta\alpha = \frac{\delta(\Delta\Psi)}{K_a} = \frac{0.01^\circ}{56.74} = 0.00018^\circ$ 。图 7 为在不同的 θ 角下,

测量灵敏区内测得的 K_a 值, 以及和理论曲线的比较, 两者完全符合。

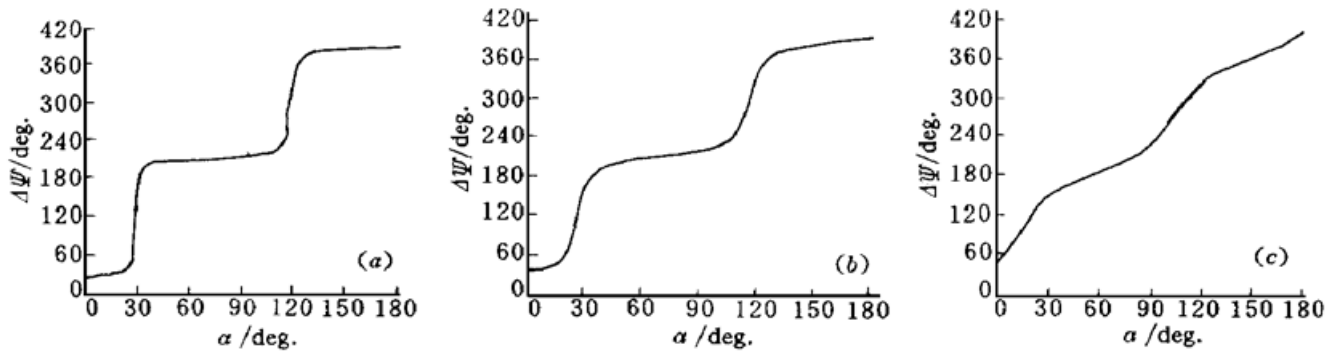


图 5 不同的四分之一波片角度下的 $\Delta\Psi$ 与滚转角关系实验曲线

Fig. 5 Experimental phase change curves with different angles of QWP

(a) $\theta = 2^\circ$; (b) $\theta = 5^\circ$; (c) $\theta = 15^\circ$

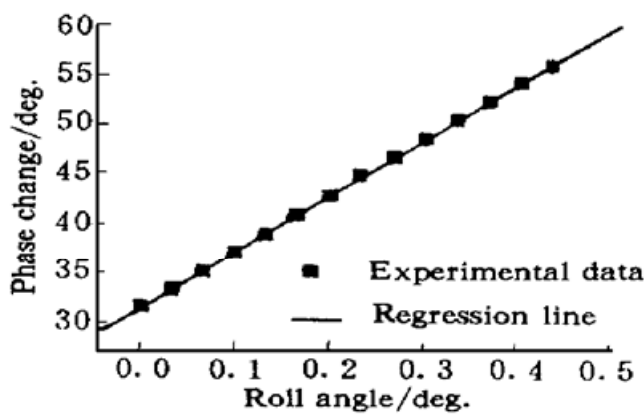


图 6 $\theta = 1^\circ$ 时灵敏区域内 $\Delta\Psi$ 与滚转角关系

Fig. 6 Experimental phase change vs the roll angle, with $\theta = 1^\circ$

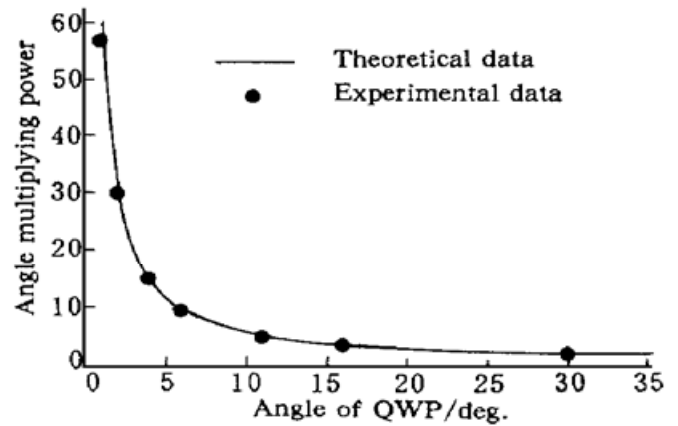


图 7 K_a 与 θ 关系实验曲线

Fig. 7 Experimental angle amplification compared with a theoretical curve

另外, 由于系统中光学元件的数量很少, 所以整个测量系统的误差来源大为减少, 在实验时观察相位计的示值变化约为 $\pm 0.03^\circ$, 相当于机械转角为 0.0005° , 没有长期漂移。

4 结 论

本测量系统把相位角对于滚转角变化的灵敏度提高至 50 多倍, 使系统的测角分辨率突破了相位计分辨率的限制。使用分辨率为 0.01° 的相位计, 滚转角的测量分辨率达到 0.00018° 。该系统具有以下优点: 首先, 系统光路简单, 外形尺寸紧凑, 重量轻; 作为角度传感器的检偏器可以放在远离激光源的地方, 且无需启动和回转力矩; 整个系统没有运动部件, 避免了死程和摩擦带来的误差。其次, 系统对检偏器的平动误差具有自适应性, 对加速度和重力不敏感; 光路的简化使引起漂移的因素大大减小, 系统工作稳定, 重复性好。再者, 如果配合上差动计数器, 使用整数-小数结合的信号处理, 可以测量大于 360° 的整周转动。此外, 系统的角度放大率还可以根据需要进行调整。最后, 值得强调的是, 该系统不仅具有很高的角度分辨率 (0.00018°), 而且测量的线性区达到 0.5° 以上; 若进一步提高探测器件的灵敏度和减小其噪声水平, 改进信号放大电路和相位计的稳定性, 测量分辨率还可以进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Yin Chunyong, Xie Guangping, Cheng Xiangyin. Measurement method of the rolling angle. *Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.)* (清华大学学报(自然科学版)), 1996, **36**(10): 86~ 91 (in Chinese)
- 2 V. P. Coronkevich, G. G. Tarasov, B. A. Hanov. Rolling angle measurement with dual-frequency laser. *Automeasurement*, 1974, (1): 68~ 71 (in Russian)

A Novel Method to Measure the Roll Angle Using a Transverse Zeeman Laser

Jiang Hong Yin Chunyong

(Department of Precision Instruments & Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A roll angle measurement system using a transverse Zeeman laser is presented in this paper. It has a large measurement range and its sensitivity is nonlinearly enhanced. The transverse Zeeman laser provides a plane polarized light, which is changed to be slightly ellipse polarized by a quarter wave plate to enhance the sensitivity nonlinearly. Then, the beam passes a analyzer and the measurement signal is detected by a photo-diode. By measuring the phase difference between the beat signal and the reference signal, the value of the roll angle of the analyzer is got. By employing the phase detector that has the resolution of 0.01° , a sensitivity of $0.6''$ in roll angle of the measurement system can be reached.

Key words sensitivity enhancement, transverse Zeeman laser, roll angle

关于中国光学学会会址变更的通知

中光学办[1999]008号

各专业委员会、地方学会及各位会员:

中国光学学会原办公地点为华北光学仪器厂,现经中国科协办公厅、中国科协学会管理服务中心决定,迁至魏公村中国科协综合业务楼办公。

中国光学学会办公室

1999年10月22日

新通讯地址:北京海淀区学院南路86号院内小白楼三层309室

邮 编:100081

电 话:62178877-5663

乘 车 路 线:320, 332, 904, 814, 816, 特6等车在魏公村站下车