

单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响

李立艳 苑勇贵 吴冰 刘彬彬 杨军 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了用于纳米测量的激光干涉仪中光学波片对非线性误差的影响,基于琼斯矩阵理论建立了多波片的误差分析模型,分析了 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片引起的干涉仪非线性误差,对波片位置引起的非线性误差进行了实验研究。结果表明,波片位置调整精度对干涉仪测量影响巨大,在 $0\sim 5^\circ$ 范围内, $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片引起的非线性误差分别为6.5 nm和9.5 nm。上述研究结果为单频偏振激光干涉仪光路调整及非线性误差的补偿提供了参考。

关键词 测量;激光干涉;纳米测量;偏振干涉;波片;非线性误差

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112009

Effect of Wave Plate on Nonlinear Error in Single-Frequency Polarized Laser Interferometer

Li Liyan Yuan Yonggui Wu Bing Liu Binbin Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The effect of wave plate on nonlinearity of single-frequency polarized laser interferometer in nano measurement is researched. An error analysis model of multi-wave-plate is established based on Jones matrices theory. The nonlinear error in interferometer induced by $\lambda/2$ and $\lambda/4$ wave plates is analyzed and nonlinear error caused by the position of wave plate is experimentally studied. The results indicate that the adjustment accuracy of wave plate position has a great influence on measurement. In the range from 0 to 5° , the non-linearities caused by $\lambda/2$ and $\lambda/4$ wave plates are 6.5 nm and 9.5 nm respectively. The research results provide a beneficial reference for optical path adjusting and nonlinear errors compensation of orthogonal polarized laser interferometer.

Key words measurement; laser interference; nano measurement; polarization interference; wave plate; non-linear error

OCIS codes 120.5050; 030.1670; 260.5430; 230.4320

1 引言

激光干涉测量技术是目前最为精确的测量方法之一,激光干涉仪作为纳米测量的重要工具吸引了研究者的密切关注^[1]。由于其具有非接触测量和测量精度高等优点,在精密和超精密测量领域得到了广泛的应用。单频零差激光干涉仪与外差激光干涉仪相比,具有测量范围广、精度高和测量速度快等优点^[2]。而基于偏振移相技术的单频激光干涉仪采

用差分信号处理后,使测量误差主要体现为较小的干涉仪非线性误差^[3],特别适用于纳米精度的测量。

纳米单频偏振激光干涉仪中由于光源偏振态不理想或不稳定、光学器件的性能缺陷或位置调整不完善、以及测量环境变化等,使偏振正交的测量光与参考光不能彻底分离而导致非线性误差产生,经理论分析误差通常可达到 10 nm^4 ,制约了干涉仪在高精度测量领域应用。因此,确定干涉仪非线性误差的来源,研究其

收稿日期: 2010-05-07; 收到修改稿日期: 2010-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(60807032,60877046)资助课题。

作者简介: 李立艳(1984—),女,硕士研究生,主要从事纳米精度激光干涉测量技术等方面的研究。

E-mail: llyswallow@126.com

导师简介: 杨军(1976—),男,博士,教授,主要从事高精度激光干涉测量及光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: yangjun141@263.net(通信联系人)

作用机理,寻找抑制或消除非线性误差的方法和途径,具有重要的理论意义和应用价值,成为国内外专家的研究焦点^[5~11,17]。文献[5~8]主要是针对双频激光外差干涉仪中偏振分光棱镜、起偏器和检偏器等引起的非线性误差的研究,而文献[9~11]虽然包含波片对非线性误差影响的研究,但主要是从理论上进行了分析和仿真,缺乏实验的有力支撑。

本文基于偏振光的琼斯理论^[12,15],建立了多波片的误差分析模型,对由波片引起单频偏振激光干涉仪的非线性误差展开了理论分析,并对由波片位置调整偏差导致的非线性误差幅值进行了定量测量。

2 单频偏振激光干涉仪非线性误差的理论分析

正交偏振激光干涉仪,由偏振干涉仪和测量装置两部分组成,如图1所示。单频激光,经过准直透镜和与 x 轴成 45° 的偏振片 P1 后变成一束线偏振光。经过偏振分光棱镜 PBS1 分束后, s 偏振分量(偏振方向沿 z 轴)被反射作为参考光束, p 偏振分量(偏振方向沿 x 轴)被透射作为测量光束。根据琼斯矩阵理论^[14],干涉仪中每个光学元件都可以采用一个琼斯矩阵来表述,于是到达半波片(HW)的参考光束 E_r 和测量光束 E_m 分别为

$$\begin{cases} E_r = \mathbf{J}_{\text{PBT}} \mathbf{J}_{\text{-QW1}} \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \mathbf{J}_{\text{QW1}} \mathbf{J}_{\text{PBR}} \mathbf{J}_{\text{P1}} E_0 \exp(-i\varphi_r) \\ E_m = \mathbf{J}_{\text{PBR}} \mathbf{J}_{\text{-QW2}} \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \mathbf{J}_{\text{QW2}} \mathbf{J}_{\text{PBT}} \mathbf{J}_{\text{P1}} E_0 \exp(-i\varphi_m) \end{cases} \quad (1)$$

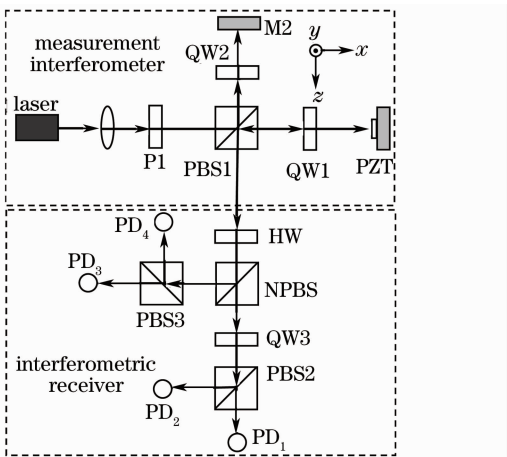


图1 单频偏振激光干涉仪

Fig. 1 Single-frequency polarization laser interferometer

式中 φ_r, φ_m 分别为干涉仪中参考光和测量光的相位, $\mathbf{J}_{\text{P1}}, \mathbf{J}_{\text{PBT}}, \mathbf{J}_{\text{PBR}}, \mathbf{J}_{\text{QW1}}, \mathbf{J}_{\text{-QW1}}$ 和 $\mathbf{J}_{\text{Mirror}}$ 分别为偏振片、偏振分光棱镜透射、偏振分光棱镜反射、 $\lambda/4$ 波片(QW)正向、反向及反射镜的琼斯矩阵。

参考光束 E_r 与测量光束 E_m , 首先经过 HW 实现 45° 的偏振态旋转, 然后被消偏振分光棱镜 NPBS 均匀地分成两束, 透射光束经过 $\lambda/4$ 波片 QW3 后, 在快慢轴之间产生 $\pi/2$ 的相移, 再经过偏振分光棱镜 PBS2 的分光作用, 产生两路干涉信号被光电探测器 PD₁, PD₂ 接收; 而反射光束直接经过偏振分光棱镜 PBS3 的分光作用, 同样产生两路干涉信号被 PD₃, PD₄ 接收。在理想情况下, 探测器接收到的光强信号 $I_1 \sim I_4$ 为^[11]

$$\begin{cases} I_1 = |E_{\text{PD1}}|^2 = E_0^2 [1 + \sin(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_2 = |E_{\text{PD2}}|^2 = E_0^2 [1 - \sin(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_3 = |E_{\text{PD3}}|^2 = E_0^2 [1 - \cos(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_4 = |E_{\text{PD4}}|^2 = E_0^2 [1 + \cos(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 PD₁~PD₄ 输出信号特征是相位互差 90° 的正交信号, 且直流分量及交流分量的振幅相等。 $\Delta\phi = \varphi_m - \varphi_r$ 为参考光束和测量光束之间的相位差, 由参考光束与测量光束之间的光程差决定; 如果采用差分信号处理方式, 则有

$$(I_1 - I_2)/(I_4 - I_3) = \tan \Delta\phi = \tan(4\pi n \Delta L/\lambda). \quad (3)$$

可见, 被测位移量 ΔL 通过相位差 $\Delta\phi$ 作用于干涉仪上。式中 λ 为干涉仪的输入光波长, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, n 为折射率, 空气中为 1, 采用差分信号处理方法能够消除光强波动引起的共模干扰。

2.1 QW 引起的非线性误差分析

单频偏振激光干涉仪中, 位于测量装置中的 QW 作用是使参考光束和测量光束偏振态在线偏振光与圆偏振光之间相互转换。而位于接收装置中的 QW 具有偏振移相作用, 使 4 路输出信号之间彼此正交。在实际测量中, QW 的性能和位置都存在一定的误差, 直接导致了非线性误差的产生。对于 QW 的性能误差, 文献[11]中做了详细的分析, 当 QW1 与 QW2 的延迟角误差之差, 以及 QW3 的延迟角误差在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 之间时, 引起的非线性误差最大值均为 4.4 nm。当 QW 存在位置误差 α 时, 其琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{J}_{\text{QW}(45^\circ+\alpha)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin 2\alpha - i(1 + \sin 2\alpha) & \cos 2\alpha(1 + i) \\ \cos 2\alpha(1 + i) & 1 + \sin 2\alpha - i(1 - \sin 2\alpha) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设干涉仪光路中除 QW 存在位置参数误差 α_n 外 (n 为波片序号), 所有光学元件均处于理想状态, 则 PD₁ ~ PD₄ 输出的干涉信号分别为

$$\begin{cases} I_1 = E_0^2 \{ \cos^2 2\alpha_1 + \cos^2 2\alpha_2 + 2\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 [\sin^2 2\alpha_3 \cos(\varphi_m - \varphi_r) + \cos 2\alpha_3 \sin(\varphi_m - \varphi_r)] + (1/2)\sin 4\alpha_3 [\cos^2 2\alpha_1 - \cos^2 2\alpha_2] \} / 8 \\ I_2 = E_0^2 \{ \cos^2 2\alpha_1 + \cos^2 2\alpha_2 - 2\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 [\sin^2 2\alpha_3 \cos(\varphi_m - \varphi_r) + \cos 2\alpha_3 \sin(\varphi_m - \varphi_r)] - (1/2)\sin 4\alpha_3 [\cos^2 2\alpha_1 - \cos^2 2\alpha_2] \} / 8 \\ I_3 = E_0^2 [\cos^2 2\alpha_1 + \cos^2 2\alpha_2 - 2\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 \cos(\varphi_m - \varphi_r)] / 8 \\ I_4 = E_0^2 [\cos^2 2\alpha_1 + \cos^2 2\alpha_2 + 2\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 \cos(\varphi_m - \varphi_r)] / 8 \end{cases} \quad (5)$$

采用差分信号处理方式, 可得干涉仪输出的非线性误差 s 为

$$s = \{ \arctan[(I_1 - I_2)/(I_4 - I_3)] - \Delta\phi \} \lambda / 4\pi = \left\{ \arctan \left[\frac{\sin^2 2\alpha_3 + \cos 2\alpha_3 \tan \Delta\phi}{4\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 \cos \Delta\phi} + \frac{\sin 4\alpha_3 [\cos^2 2\alpha_1 - \cos^2 2\alpha_2]}{4\cos 2\alpha_1 \cos 2\alpha_2 \cos \Delta\phi} \right] - \Delta\phi \right\} \lambda / 4\pi. \quad (6)$$

2.2 HW 引起的非线性误差分析

理想情况下, 位于接收装置中的 HW, 快轴方向与光轴成 22.5° , 使入射光束的偏振态发生 45° 的旋转。与理想情况不同, 实际中半波片在性能和光路调整上存在误差, 使入射光偏振态产生退化, 引起非线性误差。对于 HW 的性能误差, 文献[11]中也做了详细的分析, 当 HW 的延迟角误差在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 时, 非线性误差最大为 -1.6 nm。当 HW 的快轴与光轴之间的角度为 $22.5^\circ + \beta$, 其琼斯矩阵为

$$J_{\text{HW}(22.5^\circ)} = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ + 2\beta) & \sin(45^\circ + 2\beta) \\ \sin(45^\circ + 2\beta) & -\cos(45^\circ + 2\beta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 β 为 HW 放置的角度误差。

当 HW 快轴与光轴之间的角度为 $22.5^\circ + \beta$, 其他光学元件均处于理想状态, 可得 4 个端口输出的干涉信号分别为

$$\begin{cases} I_1 = |E_{\text{PD1}}|^2 = E_0^2 [1 + \sin(\varphi_m - \varphi_r)] / 4 \\ I_2 = |E_{\text{PD2}}|^2 = E_0^2 [1 - \sin(\varphi_m - \varphi_r)] / 4 \\ I_3 = |E_{\text{PD3}}|^2 = E_0^2 [1 - \cos 4\beta \cos(\varphi_m - \varphi_r)] / 4 \\ I_4 = |E_{\text{PD4}}|^2 = E_0^2 [1 + \cos 4\beta \cos(\varphi_m - \varphi_r)] / 4 \end{cases} \quad (8)$$

同样, 采用差动的信号处理方式, 得非线性误差 s 为

$$s = \{ \arctan[(I_1 - I_2)/(I_4 - I_3)] - \Delta\phi \} \lambda / 4\pi = \{ \arctan[\tan \Delta\phi / \cos 4\beta] - \Delta\phi \} \lambda / 4\pi. \quad (9)$$

3 非线性误差的理论仿真与实验结果

为了验证波片的非理想性对单频偏振激光干涉仪的影响, 以及上述理论分析的正确性, 搭建如图 1 所示空间光路, 整个测量系统如图 2 所示。光源采用中心波长 632.8 nm, 稳定度 10^{-9} 的 He-Ne 激光

器, 其输出光功率为 1.0 mW。压电陶瓷位移器 (PZT) 和干涉仪搭建在温度 (25°C)、湿度 (40%)、压强变化相对较小的十万级超洁净实验室的防震气浮平台上。实验采用哈尔滨工业大学博实公司研制的 MPT-1JRI 型纳米微位移台作为位移发生装置, 其分辨力为 1 nm, 位移发生范围为 10 μm , 采用专用信号解调板对干涉信号进行解调与存储。实验中, 波片的位置可通过精度为 0.2° 的波片旋转夹具来调节。

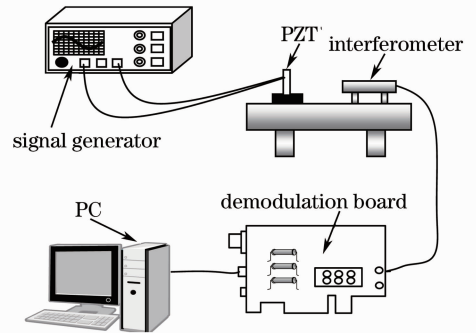


图 2 实验装置图

Fig. 2 Diagram of experimental equipment

将采集到的 4 路正交信号做差分信号处理, 可得如下 2 路原始信号:

$$\begin{cases} I_4 - I_3 = I_x = h + a \cos \phi \\ I_1 - I_2 = I_y = k + b \sin(\phi + m) \end{cases} \quad (10)$$

在理想的情况下直流项 h, k , 非正交相移 m 均为 0, 交流信号幅度 $a = b$; 而在实际应用中, 由于波片存在误差使 h, k, m 不为 0, 且 $a \neq b \neq 1$, 导致非线性误差的产生。为了定量测量非线性误差的幅值, 采用最小二乘法对测量信号进行校正, 得到校正信号 I_{x0}, I_{y0} , 原始信号与校正信号的利萨如 (Lissajous) 图形如图 3 所示。校正后的数据经 (3) 式计算得到

的干涉仪输出可作为无误差数据^[13],它与原始数据经(3)式计算得到的位移值之差,即为干涉仪的非线性误差 s ,如下式所示:

$$s = [\arctan(I_x/I_y) - \arctan(I_{x0}/I_{y0})]\lambda/4\pi. \quad (11)$$

3.1 QW 引起的非线性误差理论仿真与实验结果

根据(6)式取 $\Delta\phi$ 的变化区间为 $(-\pi/2, \pi/2)$, QW3 的位置误差分别取 $1^\circ \sim 5^\circ$, 可由 QW3 引起的非线性误差理论仿真结果,如图 4(a)所示;在保证 QW1 与 QW2 位置不变的情况下,调节 QW3 由理想位置产生 $1^\circ \sim 5^\circ$ 位置偏差,根据(11)式可得由 QW3 引起的非线性误差的实验测量结果,如图 4(b)所示。

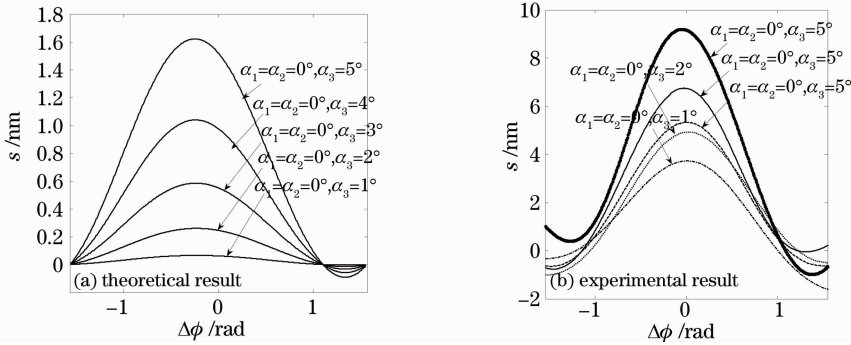


图 4 QW3 误差对测量位移非线性误差的影响

Fig. 4 Effect of the error of QW3 on nonlinear error of measuring displacement

为研究 QW1 与 QW3 的误差对于干涉仪非线性误差的影响,根据(6)式进行理论仿真,结果如图 5(a)所示;在实验定量测量中,保持 QW2 的位置不变,分别旋转 QW1 与 QW3,使其位置误差在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 内变化,对实验数据做与如图 4(b)相同的处理,得实验测量结果如图 5(b)所示。

同理,可得 QW2 与 QW3 的误差对于干涉仪测量位移的非线性误差影响的理论仿真与实验测量结果,如图 6(a),6(b)所示。

当 QW3 存在一定的位罝误差(取误差为 1°),

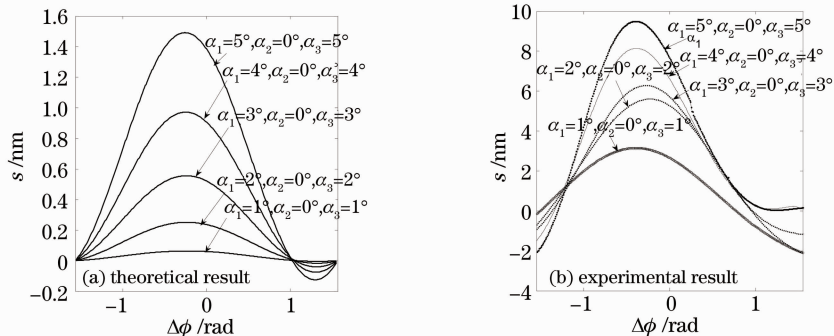


图 5 QW1 与 QW3 误差对测量位移非线性误差的影响

Fig. 5 Effect of error of QW1 and QW3 on nonlinear error of measuring displacement

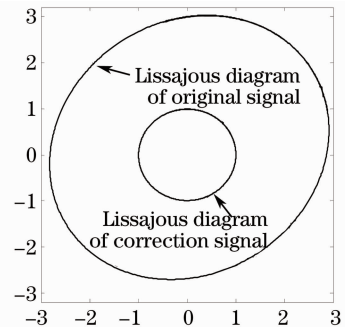


图 3 单频偏振激光干涉仪信号的 Lissajous 图形
Fig. 3 Lissajous figure of single-frequency polarization laser interferometer's signal

而 QW1 误差角度分别取 $1^\circ \sim 5^\circ$, 可得如图 7(a), 7(b)所示的 QW1 对于干涉仪非线性误差的理论仿真与实验测量结果。

由图 4(a),图 5(a)和图 6(a)仿真结果可看出当 QW 的位置误差增大时,其非线性误差也增大。而图 7(a)所示,当 QW3 误差不变,QW1 误差角度增大时,非线性误差减小。 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 时, α_3 介于 $1^\circ \sim 5^\circ$ 之间,最大的理论误差可以达到 1.6 nm。误差角度在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 内,QW1 与 QW3 的误差最大可以达到 1.5 nm, QW2 与 QW3 引起的误差最大可以达到 1.8 nm。

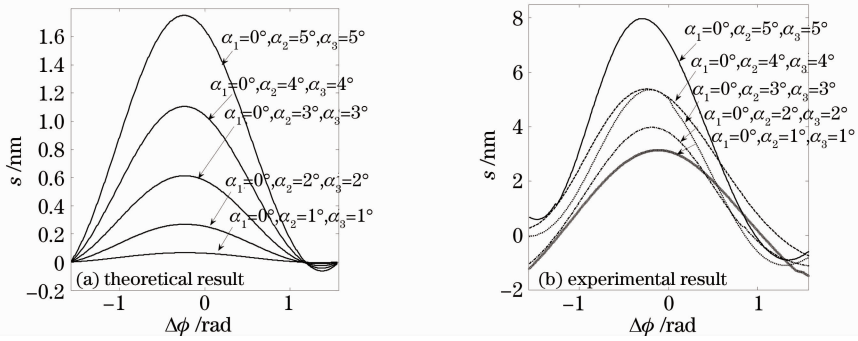


图 6 QW2 与 QW3 误差对测量位移非线性误差的影响

Fig. 6 Effect of error of QW2 and QW3 on nonlinear error of measuring displacement

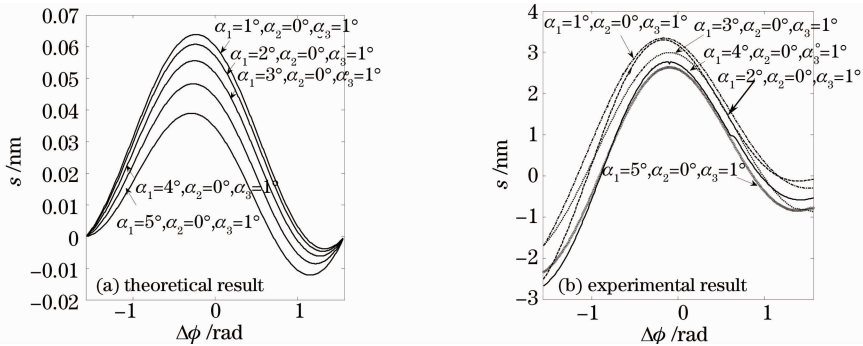


图 7 QW1 误差对测量位移非线性误差的影响

Fig. 7 Effect of the error of QW1 on nonlinear error of measuring displacement

QW3 的误差角度不变, QW1 的误差角度在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 内, 非线性误差的最大值为 0.1 nm。由图 7(a) 可知, 由 QW3 引起的非线性误差, 可通过 QW1 的位置调整得到补偿。

通过实验测量与理论仿真结果的对比, 可知实验曲线的变化趋势与理论仿真结果相同, 实验测量的非线性误差幅值在 $0 \sim 10$ nm 范围内。当误差角度分别取 $1^\circ \sim 5^\circ$, QW3 引起的最大测量误差可达 9.2 nm, QW1 与 QW3 的误差最大可达 9.5 nm, QW2 与 QW3 的误差最大为 8.0 nm。而当 QW3 的误差角度为 1° , QW1 的误差角度分别取约 $1^\circ \sim 5^\circ$ 时, 干涉仪的非线性误差最大为 3.4 nm。由于实验

中未考虑波片的性能误差, 其他光学元件的性能及初始位置误差, 波片旋转角度偏差, 导致测量位移误差值较理论分析误差值大。并且由于这些因素的存在, 以及因素之间的叠加不满足线性变化, 使实验曲线之间的变化幅度不确定。

3.2 HW 引起的非线性误差理论仿真与实验结果

根据(9)式, 令 $\Delta\phi$ 在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内, β 分别取 $1^\circ \sim 5^\circ$, 可得由 HW 位置误差引起的非线性误差的理论仿真结果, 如图 8(a) 所示; 在保证光路中 3 个 QW 位置不变的情况下, 变化 HW 位置, 并将得到数据做上述处理, 可得 HW 位置误差对干涉仪非线性误差的影响, 如图 8(b) 所示。

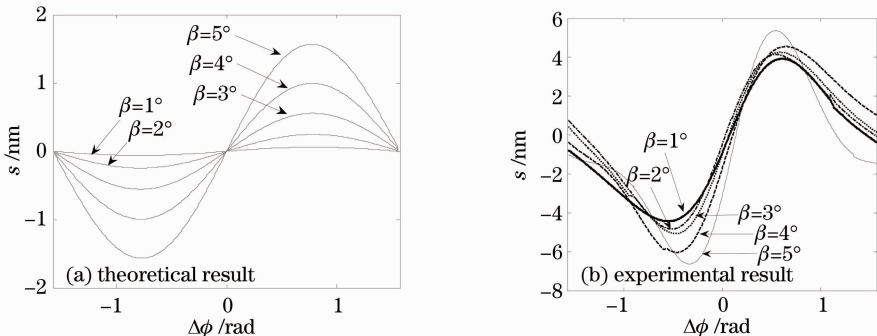


图 8 HW 误差对测量位移非线性误差的影响

Fig. 8 Effects of HW errors on nonlinear error of measuring displacement

由图 8(a)可看出当 β 增大时,测量误差增大,并且曲线具有对称性。当 β 在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 区间内,非线性误差最大可达 1.6 nm。将图 8(b)与图 8(a)对比,可看出实验曲线的变化趋势与理论曲线相同,当误差角度在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 之间变化时,测量的非线性误差幅值最大为 6.5 nm。

同理,因实验中未考虑 HW 及其他光学元件的性能和初始位置误差,波片位置变化值误差,导致测量位移误差值较理论误差值大。且由于这些误差之间的叠加具有非线性,使实验曲线之间的幅值变化不确定。

4 结 论

本文研究了波片对单频偏振激光干涉仪非线性误差的影响,理论分析与实验验证了波片位置的调整不完善会导致干涉仪产生非线性误差,其实验曲线变化趋势与理论分析结果相同,证实了理论分析的正确性,且实验测量误差幅值介于 $0 \sim 10$ nm 之间。在纳米与亚纳米测量系统中,这个值对测量结果影响巨大,因此在用于纳米测量的单频偏振激光干涉仪中,由波片引起的非线性误差是重要的误差源之一。

综上所述,在设计和调试光学系统时可通过如下措施来提高测量精度:1)选用高性能的光学元件;2)对波片等光学器件进行正确的安装,调整,尽量减小位置误差;3)调节 QW1 与 QW2 的位置尽可能相同;4)调整波片的位置,使干涉仪的非正交相移 m 接近 0;5)位移的非线性误差虽然可以通过调整光学元件的位置进行补偿,但是并不能消除,还需要采用差动信号处理方案及一定的校正算法对误差进行校正。

参 考 文 献

- Ning Zhigao, Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 852~855
- 李志高,程兆谷,高海军. 外差干涉仪混频误差分析 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 852~855
- Guo Xinjun, Wang Ji, Yan Jiahua *et al.*. Research on a kind of polarized interferometer's optical system for nanometer measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 21~24
- 郭新军,王 霁,严家骅等. 一种纳米精度偏振干涉仪光学系统的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(1): 21~24
- Tae Bong Eom, Tae Young Choi, Keon Hee Lee *et al.*. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**: 222~225
- Dai Gaoliang, Yin Chunyong, Xie Guangping. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12): 1697~1702
- 戴高良,殷纯永,谢广平. 纳米精度外差干涉仪非线性漂移的研

- 究 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1697~1702
- Wenmei Hou. Optical parts and the nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 2006, **30**(3): 337~346
- Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1281~1285
- 陈洪芳,丁雪梅,钟 志等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1281~1285
- Zhong Zhi, Tan Jiubin, Chen Hongfang *et al.*. Nonlinearity from difference between transmission coefficients of PBS in laser heterodyne interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 27~30
- 钟 志,谭久彬,陈洪芳等. 偏振分光镜传输系数不等对非线性误差的影响 [J]. *光电工程*, 2005, **32**(9): 27~30
- Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the polarizer in laser heterodyne interferometric [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(4): 460~462
- 陈洪芳,丁雪梅,钟 志等. 起偏器对激光外差干涉非线性误差的影响 [J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(4): 460~462
- Han Xudong, Ai Hua, Long Kehui. Study on a novel single frequency laser interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5): 49~51
- 韩旭东,艾 华,龙科慧. 一种新型单频激光干涉系统的研究 [J]. *光电工程*, 2002, **29**(5): 49~51
- Guo Yanzhen, Qiu Zongming, Li Xin. Analysis and calculation on nonlinearity of the laser polarized interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, **16**(4): 273~279
- 郭彦珍,邱宗明,李 信. 激光偏振干涉光路的非线性分析计算 [J]. *计量学报*, 1995, **16**(4): 273~279
- Yang Jun, Liu Zhihai, Yuan Libo. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 364~369
- 杨 军,刘志海,苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 364~369
- Peter Gregorič, Tomaž Požar, Janez Možina. Quadrature phase-shift error analysis using a homodyne laser interferometer [J]. *Opt. Express*, 2009, **31**(8): 16322~16331
- Wang Li, Zhao Baochang, Zhang Chunmin. Study on theory of polarizing Michelson interferometer for wind measurement based on polarizing arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 700~704
- 汪 丽,赵葆常,张淳民. 基于偏振阵列的偏振迈克耳孙风场探测干涉仪系统的理论研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 700~704
- Liao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003
- 廖延彪. *偏振光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- Kong Meimei, Gao Zhishan, Xu Lei *et al.*. Cyclic radial shearing interferometry based on polarization phase-shifting technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 127~131
- 孔梅梅,高志山,陈 磊,徐春生等. 基于偏振移相的环路径向剪切干涉 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 127~131
- Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706
- 周绍林,杨 勇,陈旺富. 基于双光栅的纳米测量方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 702~706
- Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yuanbin *et al.*. Influence of metal-coated mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipsometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 439~443
- 邓元龙,李岳峙,吴玉斌等. 金属反射镜对外差干涉偏测量精度的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 439~443