

文章编号: 0253-2239(2010)09-2585-05

# 偏振激光干涉仪的非线性误差实时校正方法

刘彬彬 苑勇贵 王新星 黄锋振 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** 提出一种偏振激光干涉仪的误差校正方法,可实时地对干涉信号的非线性误差进行校正。由于单频激光干涉仪中的光电元件存在的参数误差和位置误差以及外界环境因素的影响,使得输出的4路干涉信号的正交性受到破坏,产生了非线性误差。基于椭圆匹配原理,给出了非线性误差的校正算法和判据。对干涉信号的特征进行实时地统计与估值,并借助于对干涉条纹实现16384点细分,从而得到皮米级的位移测量分辨力。搭建了零差偏振激光干涉仪及振动实验装置,对校正前后的信号进行了对比实验。结果表明,经过非线性校正干涉仪信噪比提高超过30 dB,测量的分辨力优于 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

**关键词** 光学测量;误差校正;椭圆匹配;偏振干涉仪;非线性误差

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2585

## Real-Time Nonlinearity Error Correction Method of Polarizing Laser Interferometer

Liu Binbin Yuan Yonggui Wang Xinxing Huang Fengzhen Yang Jun Yuan Libo

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

**Abstract** A nonlinearity correction method for a homodyne polarized laser interferometer is proposed, which can compensate nonlinearity error for the interferometer in real-time. Because of the parameter errors, adjusting errors of optical components environment disturbing effect, the output signals' orthogonal characteristic is destroyed, which causes the nonlinearity error. Based on the ellipse fitting principle, nonlinearity error correction method is proposed. It does a real-time estimation of the interference signal's parameter characteristics and studies phase correction range that affects the correction error, then fractionizes signal by 16384 subdivisions, then a result with picometer resolution is realized. A correction criterion for real-time nonlinearity correction is proposed. A homodyne polarized laser interferometer and vibration measurement facility are established. The experimental results indicate that the signal-noise ratio of the interferometer with the nonlinear correction is 30 dB more than the one and measurement resolution is superior to  $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ .

**Key words** optical measurement; error correction; elliptical fitting; polarized interferometer; nonlinearity error

## 1 引言

激光干涉仪因其具有高精度、非接触式、可移动等优点而广泛应用于工程和实验研究。其中零差激光干涉仪是一种被广泛应用于微小振动或者位移的精密测量技术<sup>[1,2]</sup>。零差偏振型激光干涉仪因其具有共光路倍光程的特点,受环境影响小、可实现更高精度的微位移测量<sup>[3]</sup>。但非线性误差的存在,激光

干涉仪的测量分辨力无法进一步提高,限制了其在纳米测量领域中的应用。目前,国内外专家学者对非线性误差的研究多集中在外差干涉仪和移相干涉仪<sup>[4-7]</sup>。消除或者减小非线性误差的信号解调方案成为高精度零差偏振激光干涉仪亟需解决的问题之一。Wu等<sup>[8]</sup>的研究表明,在激光干涉仪中有很多导致非线性误差产生的原因,其中包括光电探测器

收稿日期: 2009-10-28; 收到修改稿日期: 2010-01-25

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

作者简介: 刘彬彬(1982—),男,博士研究生,主要从事高精度激光干涉测量方面的研究。E-mail: liubin1982@126.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,博士,教授,主要从事白光干涉、光纤智能结构及光学极限测量等方面的研究。

E-mail: lbyuan@vip.sina.com

\* 通信联系人。E-mail: yangjun141@263.net

的转换增益不等,偏振分量混叠,光学元件非理想等。对于单频偏振迈克耳孙激光干涉仪,理想情况下,四路偏振激光干涉信号两两相互正交,由于非线性误差的存在,会使得四路信号正交性受到破坏,导致幅度和相移的随机变化。Heydemann<sup>[9]</sup>提出了一种椭圆匹配校准算法用来评估测量数据误差并对其进行非正交误差校准。而在一种相移激光干涉仪中,同样也采用了椭圆匹配算法来实现高精度相位测量<sup>[10]</sup>。椭圆匹配算法已经在各种光学干涉仪的非线性校准中被采用<sup>[9,11,12]</sup>。除此之外,国内外还提出了各种非线性误差校准算法。Tong-Jin Park等<sup>[13]</sup>采用卡尔曼滤波法将非线性误差降低了一个数量级,但不适合低频信号校准;李直等<sup>[14~16]</sup>提出的神经网络法对不连续变化相位系统具有很好的校准能力;Tony等<sup>[17]</sup>利用蒙特-卡罗算法很好地消除了外差激光干涉仪的周期性非线性误差;而 Taeho Keem等<sup>[18,19]</sup>则采用全硬件电路的方法,通过增益调整来实现非线性无误差的校准,周期误差较低到了 40 pm。由于卡尔曼滤波、神经网络以及蒙特-卡罗法计算量庞大,因而限制了实时性。

本文在椭圆匹配算法基础上,提出了非线性误差实时校准方案,给出了椭圆匹配算法适用范围和校准判据,并通过实验得到皮米级的测量精度。

## 2 零差偏振激光干涉仪的非线性误差

正交偏振激光干涉仪的原理图如图 1 所示。P 为偏光器,PBS 为偏振分束镜,QW 为  $\lambda/4$  波片,HW 为半波片,M1 为参考镜,M2 为测量镜,NPBS 为消偏振分束镜,PD 为探测器。其非线性误差的来源主要是偏振分量的混叠、探测器的增益差异、光学元件及电路的非理想性。在理想情况下,干涉仪输出的两路信号,其利萨如(Lissajou)图形应该是一个单位圆。但是,由于非线性误差的存在,使得干涉仪两输出光

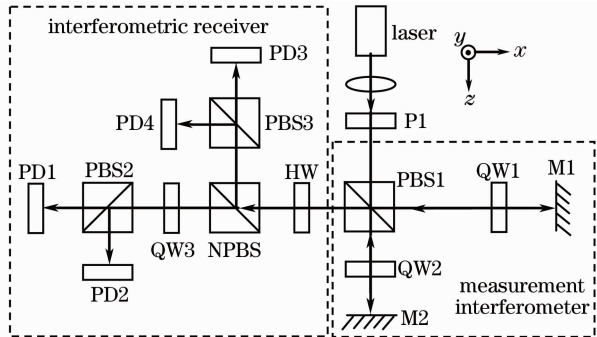


图 1 正交偏振激光干涉仪

Fig. 1 Orthogonal polarization laser interferometer

的利萨如(Lissajou)图形成一个椭圆。对于 4 路偏振激光干涉仪,干涉信号可以表示为<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} I_1 = A_1 + B_1 \sin[\varphi(t)], \\ I_2 = A_2 + B_2 \sin[\varphi(t) + \zeta_1], \\ I_3 = A_3 + B_3 \sin[\varphi(t) + \zeta_2], \\ I_4 = A_4 + B_4 \sin[\varphi(t) + \zeta_3], \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A_i (i=1,2,3,4)$  为干涉信号的直流分量,是需要去掉的。 $B_i (i=1,2,3,4)$  为交流幅度。 $\zeta_i$  则为四路信号两两之间的相位差。在理想情况下, $\zeta_i$  分别为  $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。

(1)式中的 4 路信号两两相减,可表示为两路干涉信号的形式:

$$\begin{cases} I_x = h + a \cos \Phi, \\ I_y = k + b \cos(\Phi - \delta), \end{cases} \quad (2)$$

式中  $h, k$  分别为直流分量; $a, b$  为交流幅度大小; $\Phi$  为待解调相位; $\delta$  则为两路信号之间的相位差。将  $I_x, I_y$  分别看作是  $\Phi$  的函数,则以  $I_x, I_y$  为横纵坐标绘制椭圆,在椭圆中特征参数  $h, k, a, b, \delta$  的含义如图 2 所示。

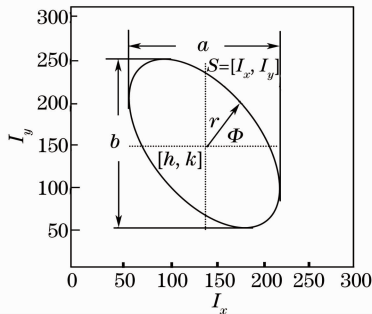


图 2 非理想情况下,两路信号 Lissajou 图形构成椭圆

Fig. 2 Two quadrature signals' Lissajou trajectory is ellipse in unideal situation

理想情况下, $\delta$  应为  $\pi/2$  或  $3\pi/2$ ,且  $h = k = 0, a = b = 1$ ,则(2)式表示的两路干涉信号变为

$$\begin{cases} I_x = \cos \Phi, \\ I_y = \sin \Phi. \end{cases} \quad (3)$$

(3)式表示的两路干涉信号构成一个理想的圆,如图 3 所示。于是相位  $\Phi$  为

$$\Phi = \arctan(I_x/I_y) + m\pi. \quad (4)$$

然而,在实际情况下,由于非线性误差的存在,将导致干涉信号中会残留直流分量,且直流分量不等;同时,也将导致 4 路信号的交流幅度大小不相等,那么对相位  $\Phi$  的解调精度则会因为这些误差的存在而变差。因此消除非线性误差是实现高精度激光干涉测量的关键。

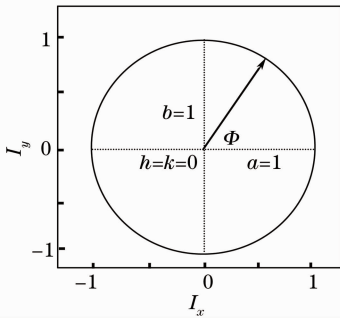


图3 理想情况下,两路信号 Lissajou 图形为单位圆  
Fig. 3 Two quadrature signals' Lissajou trajectory is unit circularity in ideal situation

### 3 非线性误差校正算法

采用椭圆匹配校准算法来实现偏振干涉仪非线性误差的实时校正。

要校正(2)式中存在的非线性误差,则可以采用基于最小二乘法的椭圆匹配算法来实现(3)式的表达式。对(2)式进行整理可以得到:

$$(I_x - h)^2/a^2 + (I_y - k)^2/b^2 = 2\cos \delta(I_y - k)(I_x - h)/ab + \sin^2 \delta. \quad (5)$$

将(5)式与标准的椭圆方程进行比对:

$$x^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0. \quad (6)$$

通过比较(5)式和(6)式,可以得到参数  $h, k, a, b, \delta$ ,

$$\begin{cases} h = (2CD - BE)/(B^2 - 4C), \\ k = (2E - BD)/(B^2 - 4C), \\ a = [(h^2 + k^2C + hkB - F)/(1 - B^2/4C)]^{1/2}, \\ b = (a^2/C)^{1/2}, \\ \delta = \arccos[-B/2\sqrt{C}]. \end{cases} \quad (7)$$

椭圆参数  $B, C, D, E, F$  成为校准算法需要计算的关键参数之一。通过测量,获得  $n$  组输入数据  $M = \{I'_x, I'_y\}_n$  代入(6)式,于是可以得到  $n$  组椭圆方程,对这  $n$  组方程采用最小二乘法原理获得最接近实际的椭圆参数解  $B, C, D, E, F$ 。将计算得到的椭圆参数  $B, C, D, E, F$  代入(7)式得到参数  $h, k, a, b, \delta$ 。最后,将参数  $h, k, a, b, \delta$  代入(5)式则可以得到校准后的干涉信号

$$\begin{cases} I'_x = (I_x - h)/a = \cos \Phi, \\ I'_y = \frac{[(I_y - k)/b - \cos \Phi \cos \delta]}{\sin \delta} = \sin \Phi, \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\{I'_x, I'_y\}$  为校准后的干涉信号。采用这种方法,不需要对测量过程中所有的测量数据都进行椭圆参数拟合,只需要对一组数据进行处理即可以得到所需要的参数,实现校准功能,极大地减小了运算量。

### 4 实时校准的判据及细分算法

对于椭圆匹配算法,仅适用于对大幅度大动态范围变化的信号进行非线性校准,而对于输入信号小于半个周期  $\pi$  或者变化极其缓慢的信号则无能为力。因此,如何对长周期小信号运用椭圆匹配算法,是该算法实用化过程中必须解决的问题之一。在椭圆匹配算法的基础上,采用周期信号区间划分法,可以解决长周期小信号输入时椭圆匹配算法的局限性,具备很好的实用价值。其算法的流程图如图4所示。

根据信号处理算法实时性以及测量精度的要求,采用正切查表插值细分法来实现一个周期内 16384 点细分。通过判断两路信号的极性以及其绝对值大

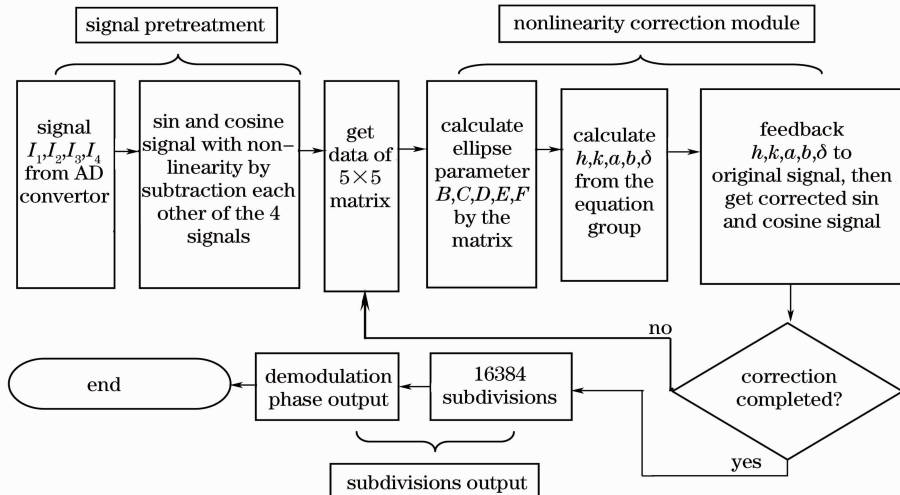


图4 非线性校准的信号解调流程图

Fig. 4 Signal demodulation flow chart of nonlinearity error correction

小将一个周期划分为 8 个区间,8 区间划分能够使得校准算法更加准确,判断选取的依据也更为有效。

无论信号是正向变化(假设逆时针是正向)还是反向变化,只判断输入信号所处的区间并将其数据值存入相应的存贮空间作为校准的数据来源。当信号长时间缓慢变化时,即信号长时间变化没有超过 4 个区间即半个周期时,数据点将被做降采样处理,这样既保证校准算法的数据完整,又不会因数据量太大而导致实时性下降。只有当信号连续变化超过 4 个区间,即变化大于  $\pi$  时,则开始启动校准程序实现一次校准。采用此算法的好处是既可以对长周期信号实现椭圆匹配算法,又可以减轻处理器的运算负荷和运算量。

## 5 实验结果与分析

为了验证上述校正算法,搭建了零差 4 路偏振

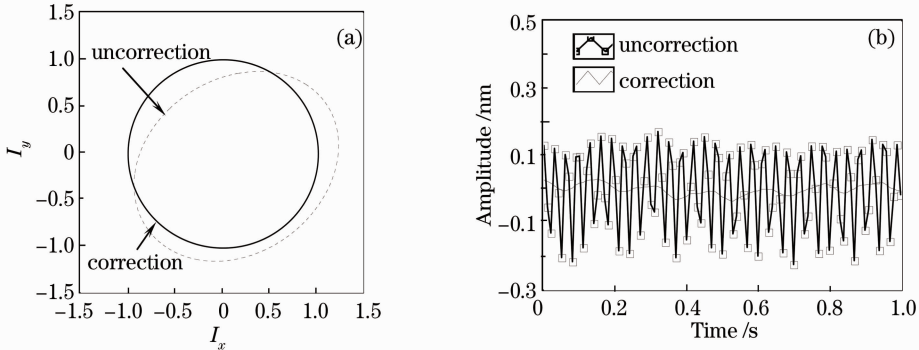


图 5 干涉信号校正前后对比。(a) Lissajou 图形对比;(b)误差曲线对比

Fig. 5 Interference signal contrast between un-correction and correction. (a) Lissajou trajectory; (b) error curve

图 6 是解调信号校正前后的信噪比。对于微振动台发出的 30 Hz 振动信号,未校正前基频信噪比约 62 dB,振动信号的二次谐波与三次谐波分量已经完全淹没在噪声中,如图 6(a)所示。而经过非线性校正算法后,振动信号基频的信噪比提高到了

光干涉仪,用于振动测量,并编写了相应的非线性校正算法程序。实验信号源采用分辨力为 0.5 nm 动态范围为 20  $\mu\text{m}$  的纳米微振动台作为测量信号源。用数据采集卡采集干涉仪输出信号数据。光源采用中心波长为 632.8 nm,频率稳定度为  $1 \times 10^{-9}$  的高稳频氦氖激光器,其出射光功率为 0.8 mW。实验平台采用气浮式隔振光学平台,有效地去除了大地振动噪声。

实验中,使用纳米微振动台发出振幅为 300 nm,频率为 30 Hz 的振动信号。图 5 为干涉信号校正前后对比。可以看出干涉信号的 Lissajou 图形的椭圆率,非线性校正后的要远优于未经校正的,如图 5(a)所示,校正前后非线性误差时域曲线波形的对比,如图 5(b)所示。

92 dB,其二次谐波和三次谐波分量也达到了 30 dB,如图 6(b)。噪声水平从校正前的 280  $\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$  提高到了 10  $\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ ,可以看出,经过非线性校正的信号的信噪比要比未经过非线性校正的信噪比提高 30 dB。

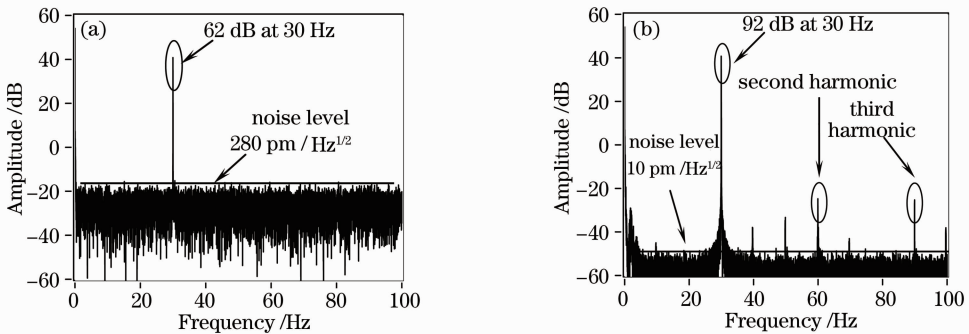


图 6 (a)校正之前和(b)校正之后的信噪比

Fig. 6 Signal to noise ratio of (a) uncorrection and (b) correction

除此之外,实验还对具有不同相位误差的信号进行了椭圆匹配算法校准,实验结果表明,当信号相位变化大于半个周期即  $\pi$  时,椭圆匹配校正算法可以对系统的非线性误差进行很好的校正,校正后测量分辨力可以达到  $10 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 。

## 6 结 论

本文讨论了正交偏振激光干涉仪信号特点,并分析了位移及振动测量信号非线性误差的存在原因及其特点。在基于椭圆匹配算法的理论分析基础上,提出了用于偏振正交激光干涉仪的非线性误差实时校正算法,并分析了椭圆匹配算法的适用范围。除此之外,对于长周期缓变信号,还给出了椭圆匹配算法的校准判据及处理方法。实验结果表明,该非线性误差校正方法配合 16384 的条纹细分技术,经过非线性校正的信号比没有经过校正的信号信噪比提高了 30 dB,测量的分辨力优于  $10 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 C. M. Wu, C. S. Su, G. S. Peng *et al.*. Polarimetric, nonlinearity-free, homodyne interferometer for vibration measurement [J]. *Metrologia*, 1996, **33**(6): 533~537
- 2 Chen Bo, Zhen Shenglai, Li Min *et al.*. Four-channel balancing method for micro-vibration measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 309~312  
陈博,甄胜来,黎珉等.微振动四路平衡测量法[J].光学学报,2009, **29**(6): 309~312
- 3 N. Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**(19): 907~926
- 4 Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yubin *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椭圆测量精度的影响[J].中国激光,2009, **36**(2): 439~443
- 5 Chen Benyong, Mu Ruizhen, Zhou Yanjiang *et al.*. Nonlinear error analysis of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 240~244  
陈本永,穆瑞珍,周砚江等.激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J].中国激光,2008, **35**(2): 240~244
- 6 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1027~1030  
陈洪芳,丁雪梅,钟志等.减小外差干涉仪一次谐波非线性误差的方法[J].光学学报,2007, **27**(6): 1027~1030
- 7 Zeng Danhua, Xiao Tiqiao, Xi Zaijun *et al.*. Detector nonlinear error and compensation in phase-stepping interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1358~1362  
曾丹华,肖体乔,席再军等.移相干涉仪中探测器非线性误差及其补偿[J].光学学报,2006, **26**(9): 1358~1362
- 8 Chienming Wu, Chingshen Su. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(1): 62~68
- 9 Peter L. M. Heydemann. Determination and correction of quadrature fringe measurement error in interferometers [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(19): 3382~3384
- 10 C. T. Farrell, M. A. Player. Phase step measurement and variable step algorithms in phase-shifting interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**(10): 953~958
- 11 Chienming Wu, Chingshen Su, Gwosheng Peng. Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(4): 520~524
- 12 V. Greco, C. Iemmi, S. Ledesma *et al.*. Multiphase homodyne interferometry analysis of some error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13): 2207~2213
- 13 Tong-Jin Park, Hyeun-Seok Choi, Chang-Soo Hanb *et al.*. Real time precision displacement measurement interferometer using the robust discrete time Kalman filter [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2005, **37**(3): 229~234
- 14 Zhi Li, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. Correction of nonlinearity in single-frequency interferometry [C]. *SPIE*, 2002, **4902**: 398~405
- 15 Zhi Li, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. A neural network approach to correcting nonlinearity in optical interferometers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(3): 376~381
- 16 Zhi Li, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. Investigation of neural network modeling for instantaneous phase in single-frequency interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 121~124  
李直, Konrad Herrmann, Frank Pohlenz. 单频干涉仪瞬时相位计算的神经网络模型[J].光学学报,2003, **23**(1): 121~124
- 17 Tony L. Schmitz, Hyo Soo Kim. Monte Carlo evaluation of periodic error uncertainty [J]. *Precision Engineering*, 2007, **31**(3): 251~259
- 18 Taeho Keem, Satoshi Gonda, Ichiko Misumi. Removing nonlinearity of a homodyne interferometer by adjusting the gains of its quadrature detector systems [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2443~2448
- 19 Taeho Keem, Satoshi Gonda, Ichiko Misumi *et al.*. Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(11): 3492~3498
- 20 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