

文章编号 1004-924X(2020)04-0878-07

基于光强实时反馈控制和同步校准的 波长调谐移相干涉系统

卢庆杰¹, 刘 薇¹, 魏光宇¹, 韩 森^{1,2*}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 波长调谐移相干涉技术是通过改变光波长来计算相位的。为了减少可调谐激光器在变波长进行移相时光功率的随机变化对相位计算产生的误差, 本文提出了一套光强实时反馈控制系统和同步校准方案。首先分析了光强在某一范围内的随机变化产生测量误差, 并选用合适的光电检测设备搭建了一套光强控制系统。该系统能够将光信号转化为电信号, 并通过 PID 来实现对光强的控制。实验结果表明, 本系统能够将光强的变化范围控制在 $\pm 0.002 \text{ mW}$ 以内, 其响应速度达到 600 kHz , 已远远超过干涉仪 CCD 的取图速度。最后, 对口径为 50 mm 的光学元件进行表面形貌检测, 加入本控制系统后, 面形精度的测量指标 PV 值和 RMS 值分别提高了 $1.53 \times 10^{-2} \lambda$ 和 $2.43 \times 10^{-3} \lambda$, 表明本系统在高精度的光学元件检测领域具有重要的实用价值。

关 键 词: 光学面形检测; 波长调谐; 光强控制; 实时反馈; 同步校正

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0878

Wavelength-tuned phase-shifting interference system based on optical power real-time feedback and synchronous calibration

LU Qing-jie¹, LIU Wei¹, WEI Guang-yu¹, HAN Sen^{1,2*}

(1. *School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

2. *Suzhou W&N Instruments LLC, Suzhou 215123, China)*

* *Corresponding author, E-mail: senhanemail@126.com*

Abstract: Wavelength-tuned phase-shifting interferometry facilitates phase measurement by changing the wavelength of a tunable diode laser. Random variation of the optical power can cause phase errors during the phase-shifting process. To address this problem, an optical power real-time feedback control system and synchronous calibration scheme were developed. First, the measurement error caused by random variation of the optical power was analyzed. An optical power control system was then developed by utilizing suitable optoelectronic detection equipment to convert optical signals into electric signals, such that the optical power can be controlled using a PID. The experimental results show that

收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-10-20.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发项目 (No. 2016YFF0101903)

the accuracy of the optical power is $\pm 0.002\text{ mW}$ and the response speed can approach 600 kHz . Finally, the system was evaluated by detecting the optical component surface. When assembling the system, the PV and RMS are improved by $1.53\times 10^{-2}\lambda$ 和 $2.43\times 10^{-3}\lambda$, respectively. This system has an important role in high-precision optical component detection.

Key words: optical surface measurement; wavelength-tunned; optical power control; real-time feedback; synchronous calibration

1 引言

相移干涉测量技术在高精度的光学元件表面检测中具有广泛的应用。传统的相移干涉技术主要是压电陶瓷移相法。该方法通过机械结构将压电陶瓷固定在参考镜上,根据每次给定的驱动电压来改变其伸缩量,改变光程差从而达到移相的目的。波长调谐相移干涉仪是通过改变波长的方式来实现移相,对激光控制器输入特定的电压信号就能使激光波长在一定的范围内发生变化。相比压电陶瓷移相的方法,波长移相技术减少了因推动参考镜而产生的振动误差以及空气抖动带来的影响。同时,相位分离算法能够实现超光滑物体表面多幅干涉条纹的分离,在测量平面平板物体的前后表面、厚度以及材料均匀性中具有重要的应用。

在干涉测量过程中,当可调谐激光器波长改变时,根据激光器的出厂数据以及在实际的光功率测量可以发现,激光器的输出光强随着控制电压的改变而改变,这会对 CCD 取图时造成一定的影响,在计算相位时会产生相位误差,从而降低干涉仪的测量精度。因此,对于波长调谐移相干涉仪技术中相位的精准计算,国内研究人员提出了光强自标定移相算法等多种算法^[1]。该算法根据电压调制与光强变化的关系得出数学模型,然后通过最小二乘法来确定相关参数。但在实际变波长的过程中,激光光强都是随机变化的^[2-5],因此该方法只限于某一种已知的调制电压和光强变化的情况。还有基于李萨如图的最小二乘拟合法来求解相位量^[6],但该方法仅适用于移相步进量小于 $\pm\pi$ 的情况。

本文针对光强不稳定引起的测量误差提出了一套光强自动反馈控制系统,并根据可调谐激光器的特性选用相应的光电设备进行实验搭建。该系统能够巧妙地将光信号转换为电信号并进行调

制,在快速检测到光强变化后,可根据相关算法进行同步校正。系统响应速度远远超过了本实验干涉仪 CCD 的取图速度,且该系统能够将光强稳定在理想的设定值,其控制精度达到微瓦级,测量误差值与仿真模拟值接近,说明本系统能够快速有效地控制光强的稳定,在一定程度上提高了本实验室自主研发干涉仪的测量精度。

2 光强变化产生的误差及仿真分析

2.1 光强变化引起的相位误差

图 1 为波长调谐干涉仪测量平面平板元件的光路系统。该系统采用非索相移干涉仪结构。整个系统主要由可调谐半导体激光器光源、扩束准直系统以及干涉成像系统组成^[7-9]。与传统压电陶瓷相移干涉仪不同,波长调谐干涉仪是通过改变光波长来达到移相的目的^[10-13]。在测量过程中,平面平板元件表面任意一点的相位可以表示为:

$$\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda},$$

(1)

其中: h 为干涉腔长, λ 为可调谐半导体激光器的输出波长。因此,假定可调谐激光器输出的初始波长为 λ_0 ,在进行 n 次变波长后,干涉图上任一点的光强可以表示为:

$$I_n(x,y) = I_a(x,y) + I_b(x,y)\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda_0 + n\Delta\lambda}\right),$$

(2)

式中: $I_a(x,y)$ 为背景光强, $I_b(x,y)$ 为调制光强, n 表示移相次数^[14-15]。由出厂数据可知,本系统光源的电压调制和输出功率之间的关系是非线性的。若根据式(1)和式(2)来计算被测物体的表面形貌,由于式(2)中干涉图的调制光强和背景光强都发生了变化,这会影响相位值的最终计算结果,从而对峰值(Peak Value, PV)和均方根(Root Mean Square, RMS)值产生一定的影响。1989

年,de GRooT 等人推导出相位误差与光强误差之间的关系,其表达式如下:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \sigma_I^2 \sum_n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial I_n} \right)^2. \tag{3}$$

当使用五步算法进行移相时,由式(1)~式(3)计算得出的相位误差与光强误差之间的关系式如下:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sigma_I^2}{16 I_b^2(x,y)}. \tag{4}$$

可以看出,在进行波长调谐时,光强的随机变化会对测量结果造成相应的误差影响。

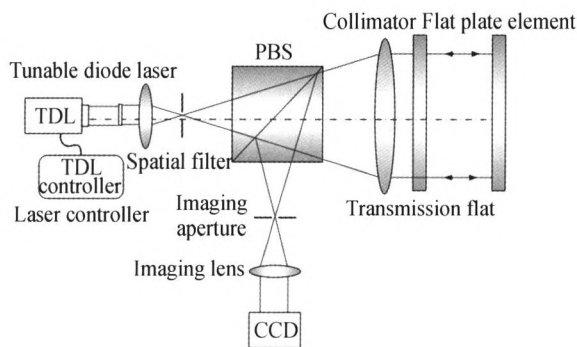


图 1 波长调谐干涉仪测量系统光路

Fig. 1 Optical path of wavelength-tuned interferometer measurement system

2.2 误差仿真及分析

为了验证可调谐激光器在改变波长时光强变化产生的相位误差及它对测量精度的影响,根据激光器的出厂数据报告,设定光强在波长调制时的理想设定光强值的 20% 内随机变化,中心波长 $\lambda_0 = 632.8\text{ nm}$, 当使用四步算法计算相位时,相位与光强之间的计算公式为:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 - I_3} \right). \tag{5}$$

当光强在其理想设定值的 20% 以内变化时,对被测面上的点进行相位计算。由式(1)可知,任意一点的光强可以表示为:

$$I'_n(x,y) = I_n(x,y) * [0.8 + 0.2 * \text{rand}(1,1000)]. \tag{6}$$

根据以上公式能够计算出理想相位值与光强变化后得到的相位值,结果如图 2 所示。理想相位值为 $0.785\ 4\pi$ 弧度,任一点的相位经光强变化后其相位的变化量在 $0.012\ 5\pi$ 到 $0.250\ 5\pi$ 之间。因此,经过 50 次模拟计算,可以根据得出的相位差值来计算光强变化对测量结果的 PV 和

RMS 值的影响。如图 3 所示,激光光源变化率为 20% 时误差的 PV 值从 12.8 nm 到 14.8 nm, RMS 值从 2.7 nm 到 2.9 nm。由以上分析结果可知,在计算相位时光功率的变化会影响面形测量精度,从而产生误差。

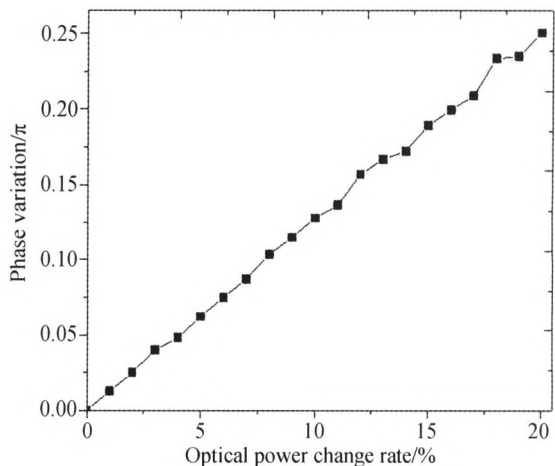


图 2 相位变化结果

Fig. 2 Phase variation result

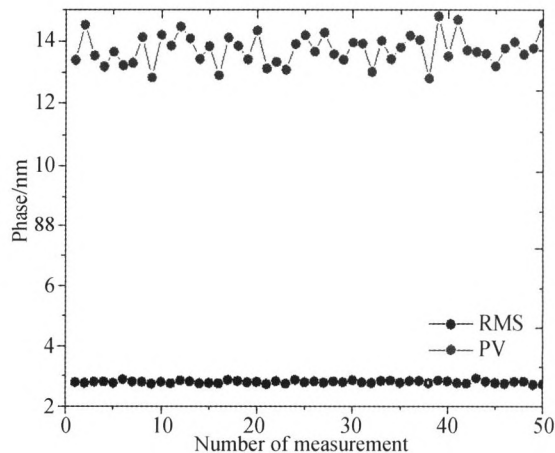


图 3 光强变化产生的 PV 和 RMS 误差仿真结果

Fig. 3 Simulation results of PV and RMS errors caused by optical power variation

3 系统设计及分析

为了解决上述问题,本文设计了一套光强反馈控制系统,在可调谐激光器外部达到光强调制的目的。通过硬件设备搭建与软件实时反馈相结合,能够对光功率的变化实时监测并且同步进行校正输出。图 4 描述了光功率控制系统的设计方

案。如图所示,由光源发出的光束经偏振片后按一定的比例分为两束光,一束光用来检测光强的变化,另一束光经调制后进入到干涉仪光路系统。根据光电效应的原理,当光源对准光电探测器的感光中心时,光电探测器能够快速将光信号转化为电信号。数据采集卡将采集到的电信号进行计算并分析光强的变化,然后根据相关算法得出相应的校准电压。最后,校准电压经高压放大器放大后驱动电光振幅调制器,从而改变电光振幅调制器的光强透射率,达到调制光强的目的。

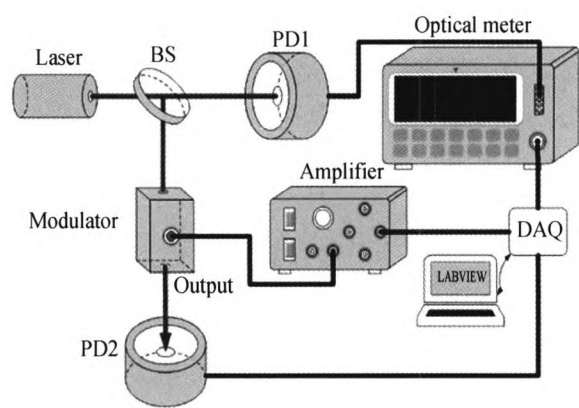


图 4 光功率实时反馈控制系统

Fig. 4 Optical power real-time feedback control system

本系统所采用的可调谐激光器的波长调制范围为 632.70~632.97 nm,其最大输出功率不超过 4 mW,满足所选用光电探测器的线性响应范围。由于光电探测器的响应度为 0.389 A/W,根据数据采集卡采集到的电信号可以计算出相应的光功率。光电探测器的响应度容易受到温度的影响,经过实验验证其最佳效果应该保持在 23℃左右。同时,本系统将通过 Labview 软件在程序中建立一个同步校正输出任务,将采集到的电信号经过 PID 控制同步输出。值得注意的是,由于放大器的最大放大电压是 200 V,同时它的增益是 40,所以数据采集卡的输出电压不能大于 5 V。所用采集卡的最高采样率为 205 Ks/s,模拟转换器的分辨率为 16 位,即当输出满量程为 10 V 时,单位量程为 10 000/65 536=0.15 mV,该量程能够满足本系统的精度要求。在 PID 控制的同步输出过程中,主要根据电光振幅调制器的输出特性来设计 PID 的设定值以及理想值。电光振幅调制器的驱动电压与光强透射率的关系如图 5 所

示。从图可以看出,不同的驱动电压能够改变入射光强的透射率。当中心波长为 632.8 nm、驱动电压为 190 V 时,入射光强的透射率为 100%,它们之间的函数关系式如下:

$$I_0 = I_i \sin^2\left(\frac{V_i}{V_\pi} \times \frac{\pi}{2}\right), \tag{7}$$

式中: I_0 为输出光强, I_i 为入射光强, V_i 为输入的驱动电压, V_π 为对应波长光强透射率为 100% 的电压。由式(7)可以看出,电光振幅调制器能够将光强的调制转化为电信号的调制。

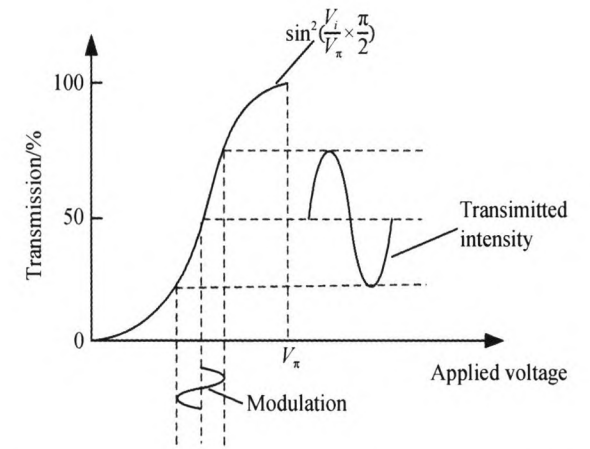
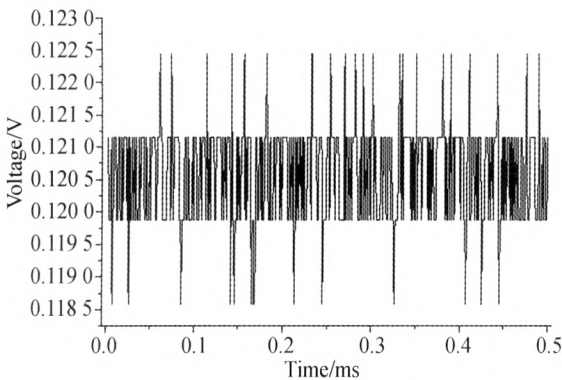


图 5 电光振幅调制器驱动电压与光强透射率的关系

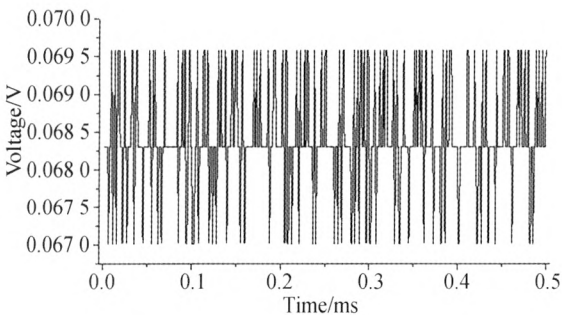
Fig. 5 Relationship between driving voltage of amplitude and optical power transmission

4 实验结果

首先,对光强反馈控制系统实现的基本功能进行验证。对不同光强值进行了设定,按照图 4 的方案在可调谐激光器外部搭建光强反馈控制系统。先通过光电探测器来测出所设定光强值对应的理想电压值,然后将它设定为 PID 控制器的理想输出,在激光器光源外部加入一个光栅来改变光强通过量,最后通过数据采集卡采集到的电信号来观察反馈系统的控制状态。如图 6 所示,分别对光强为 0.088 mW 和 0.064 mW 的情况进行控制,其对应的电压值分别为 0.121 1 V 和 0.068 3 V。从图中可以看出,当改变光功率时,考虑到光电探测器暗电流以及周围温度的影响,电压值在理想设定值附近波动,说明该系统能够将光强值稳定在设定值左右,其控制精度能够稳定在±0.002 mW之间。



(a) 理想光强值为 0.088 nW 的电压状态
(a) Voltage state at ideal optical power of 0.088 nW



(b) 理想光强值为 0.064 nW 的电压状态
(b) Voltage state at ideal optical power of 0.064 nW

图 6 光强稳定时的电压状态
Fig. 6 Voltage state at stable optical powers

其次,控制系统的响应速率也是衡量本系统的一个重要标准,在实际的干涉仪测量中具有重要意义。由于干涉测量中 CCD 取图频率为 30 Hz,即要求本系统每一次的校正需要在每次移相间隔之间完成。图 7 显示了光强的稳定过程。系统设定光强值对应的电压值为 0.063 V,考虑到

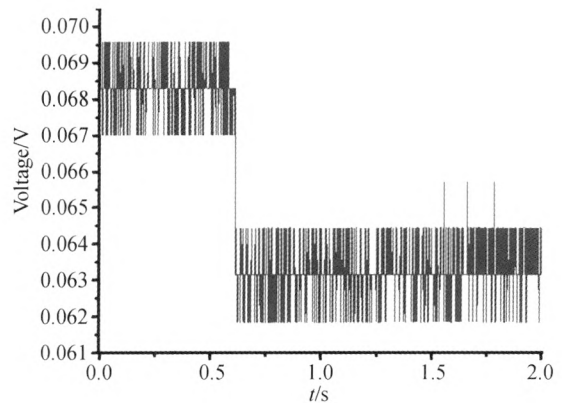
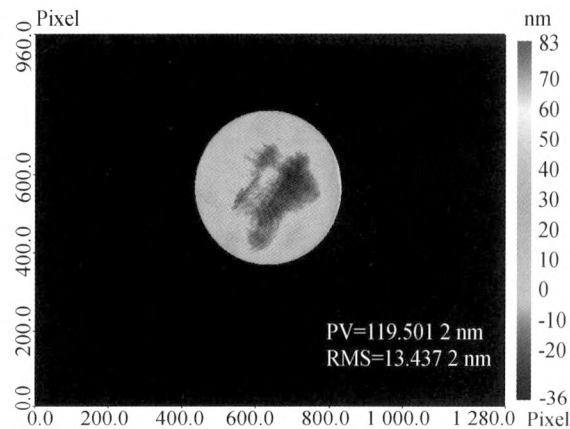


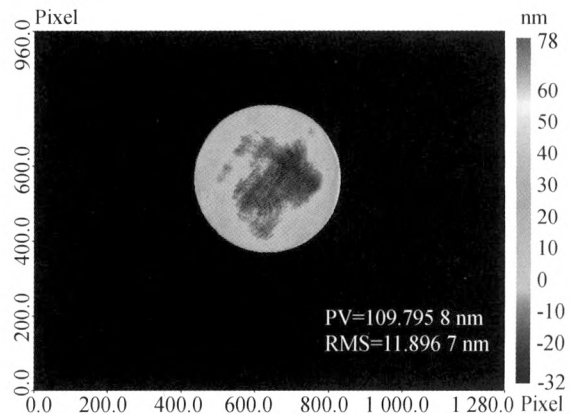
图 7 光强反馈控制系统的响应过程
Fig. 7 Response process of light intensity feedback system

所用数据采集卡的最高采样率为 250 Ks/s,而电光振幅调制器的带宽能达到 600 MHz,受限于数据采集卡的采样速率,本系统的系统响应速率约为 600 kHz。实际上,本系统的响应速率已经远远超过了 CCD 干涉仪的取图速度,能够适用于实际的干涉测量中。

最后,将本文提出的系统加入到自主研发的波长调谐移相干涉仪中进行验证,对口径为 50 mm 的平板平行元件进行测量。首先,对未加入光强反馈控制系统的波长调谐干涉仪进行样品测量,通过多次平均后的测量结果如图 8(a)所示。由于元件边缘有较多毛刺,因此设置掩膜为 97% 来计算测量结果,最后得到的 PV 值为 119.501 2 nm,RMS 值为 13.437 2 nm。然后,在波长调谐干涉仪光路系统中加入反馈控制系



(a) 未加入反馈系统时测得的 PV 和 RMS
(a) PV and RMS calculated without feedback system



(b) 加入反馈系统后测得的 PV 和 RMS
(b) PV and RMS calculated with feedback system

图 8 平面平板元件的测量结果
Fig. 8 Measurement results of parallel transparent object

统,测量结果如图8(b)所示。在测量前先将中心波长为632.8 nm对应的光强作为理想光强值,在改变波长时对其光强进行控制,在相同测量条件下,最后测得的PV值为109.795 8 nm,RMS值为11.896 7 nm。

为了验证本系统对光强控制效果的稳定性,在同一实验条件下进行了30次重复性测量,结果如图9所示,测得PV值的标准差为 $5.45 \times 10^{-3} \lambda$,

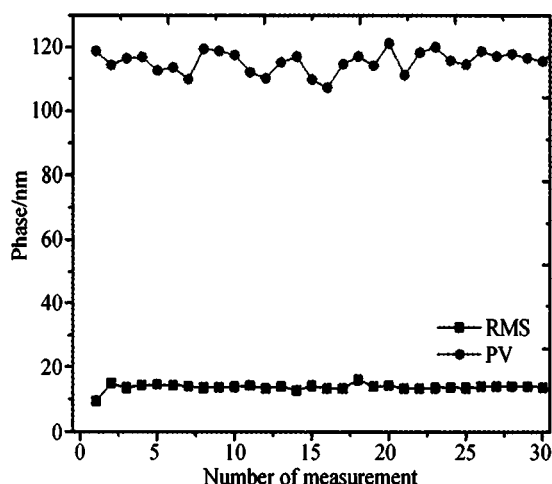


图9 30次测量得到的PV和RMS

Fig. 9 PV and RMS obtained from 30-time measurement

参考文献:

- [1] 刘江,苗二龙,曲艺,等. 基于光强自标定移相算法检测光学面形[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2007-2013.
LIU J, MIAO E L, QU Y, *et al.*. Measurement of optical surface based on intensity self-calibration phase-shift algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2007-2013. (in Chinese)
- [2] GOODWIN E P, WYANT J C. *Field guide to interferometric optical testing* [M]. Bellingham: SPIE, 2006.
- [3] CAO T N. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *SPIE*, 1992, 1720: 581-585.
- [4] DE GROOT P J. Vibration in phase-shifting interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(2): 354-365.
- [5] QIAN K M, WU X P, ASUNDI A. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13):

RMS值的标准差为 $1.58 \times 10^{-3} \lambda$ 。上述结果表明,本文提出的反馈控制系统能有效提高测量精度。

5 结论

本文首先对波长调谐移相干涉仪中波长改变时光强的变化对计算相位以及测量结果的影响进行了误差分析和仿真,然后根据实际光路系统设计了一套光强反馈控制系统,该系统能够将光信号转化为电信号。通过相关硬件搭建和软件使用PID控制来实现光强的实时反馈控制,再将反馈后的数据加入波长调谐移相干涉仪光路系统中进行最终结果的验证。实验结果表明,本系统能够将光强稳定在任一设定值之间,其控制精度能够达到 ± 0.002 mW,其响应速度为600 kHz,远远超过了CCD的取图速度。最后,对有无该光强反馈控制系统的波长调谐干涉仪系统进行测试,两者的测量结果进行相减得到PV值的差值为 $1.53 \times 10^{-2} \lambda$,RMS值的差值为 $2.43 \times 10^{-3} \lambda$ 。在相同实验条件下进行了30次重复性测试,PV值和RMS值的标准差分别为 $5.45 \times 10^{-3} \lambda$ 和 $1.58 \times 10^{-3} \lambda$,验证了系统的稳定性。本文提出的光强实时反馈系统在移相干涉仪测量中具有重要的应用价值。

2448-2453.

- [6] 于藏洁,张本好,焦云芳. 基于时域傅里叶变换的波长移相算法[J]. 计量学报, 2004(4): 310-313.
YU Y J, ZHANG B H, JIAO Y F. Algorithm of phase-shifting by wavelength tuning based on temporal DFT[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004(4): 310-313. (in Chinese)
- [7] BANSAL D, KHAN M, SALHAN A K. A computer based wireless system for online acquisition, monitoring and digital processing of ECG waveforms[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2009, 39(4): 361-367.
- [8] 赵智亮,陈立华,赵子嘉,等. 半导体双波长透射式红外干涉仪的研制及应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2639-2646.
ZHAO ZH L, CHEN L H, ZHAO Z J, *et al.*. Fabrication and application of dual-wavelength infrared transmission-type interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2639-2646. (in Chinese)
- [9] 赵维谦,李文字,赵齐,等. 被测件随机移相干涉

面形测量方法[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2167-2172.

ZHAO W Q, LI W Y, ZHAO Q, *et al.*. Surface measurement by randomly phase shifting interferometry of measured element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2167-2172. (in Chinese)

[10] YAGHOBI O, KARIMIALAVIJEH H. Single step process for optical microfiber in-line Mach-Zehnder interferometers fabrication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(10): 915-918.

[11] WANG F, ZHU S, LU Q J, *et al.*. Nonlinear control of a piezoelectric actuator system for a phase shift interferometer[J]. *Journal of Optical Technology*, 2019, 86(5): 296-300.

[12] WANG B, TIAN J J, HU L, *et al.*. High sensitivity humidity fiber-optic sensor based on all-agar Fabry-Perot interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 4879-4885.

[13] LIAO M L, XIAO J L, HUANG Y Z, *et al.*. Tunable optoelectronic oscillator using a directly modulated microsquare laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(13): 1242-1245.

[14] ZHENG J C, FU M Y. Saturation control of a piezoelectric actuator for fast settling-time performance[J]. *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 2013, 21(1): 220-228.

[15] DE GROOT P. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(16): 2658-2663.

作者简介:



卢庆杰(1991—),男,广东湛江人,博士研究生,2016 年于上海理工大学获得硕士学位,主要从事干涉仪光电系统控制方面的研究。Email: 161390018@student.usst.edu.cn

通讯作者:



韩 森(1961—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1997 年于德国斯图加特大学获得博士学位,主要从事光学干涉技术、纳米测量技术、精密光学仪器、透射波前检测技术以及自动控制等方面的研究。Email: senhanemail@126.com

(本栏目编辑:曹 金)