

多波长显微干涉的光强一致性控制方法

翟中生^{1*}, 黄娇洁¹, 赵杭¹, 李劲松¹, 吕清花², 王选择¹

¹湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 提出一种多波长显微干涉光强一致性的控制方法。将光强可调的白光 LED 作为多波长光源, 在显微干涉光路中加入光强探测器, 将从不同滤光片出射光的光强实时反馈到 STM32 单片机中, 通过 PID (Proportion Integration Differentiation) 控制快速调整 LED 输出光强, 实现不同波长光强的一致性, 进而得到灰度分布一致的多波长干涉图像。实验结果表明, 本文方法能够使不同波长的光强快速准确地稳定在设定值, 将对应的不同波长干涉图像对比度误差从 18% 减小到 2%。

关键词 测量; 多波长干涉; 光强一致性; 比例积分微分控制; 干涉图像

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031202

Intensity Consistency Control Method for Multi-Wavelength Micro-Interferometry

Zhai Zhongsheng^{1*}, Huang Jiaojie¹, Zhao Hang¹, Li Jinsong¹, Lü Qinghua², Wang Xuanze¹

¹Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quantity Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

²School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract This study presents a method for controlling the intensity consistency of multi-wavelength micro-interferometry. A white LED with tunable intensity is used as the multi-wavelength source. A detector is placed in the micro-interferometry optical path to detect intensity of light emitted from different filters, and the signal is fed back to an STM32 microcontroller in real time. Light intensities from different optical filters are quickly adjusted to be consistent using PID (proportion integration differentiation) control method and multi-wavelength interferograms with consistent gray distribution are obtained. The experimental results show that the presented method can quickly adjust the illumination intensity at different wavelengths, accurately stabilize at the set value, and reduce interferogram contrast error from 18% to 2%.

Key words measurement; multi-wavelength interferometry; intensity consistency; proportion integration differentiation control; interferogram

OCIS codes 120.3180; 040.5160; 130.3120; 100.3175

1 引言

测量微观结构的表面形貌是精密测量领域的一个重要研究内容^[1-4], 如光学元件加工质量检测^[5-6], 微机电器件的结构特征^[7], 材料表面的亲、疏水性^[8-9]等都需要精密测量。多波长干涉测量作为一种重要的非接触式测量方法, 不会对被测表面造成

损伤, 还具有测量范围大、测试精度高的优点^[10-13]。

目前, 获得多波长的方法为: 使用颜色不同的单色光组合成多波长; 从白光中分解出多波长^[14]。Hata 等^[15]将发光二极管(LED)的 R、G、B 三种单色光作为干涉光源, 当一个波长采集完干涉图样后切换到下一个波长进行采集。这种测量方法的好处在于单色光的相干长度长, 采集的干涉条纹信噪比

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-07-18; 录用日期: 2019-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575164, 51405143)、湖北省教育厅重点项目(D20161406)

* E-mail: supersakula@163.com; ** E-mail:

较高,缺点是这几种独立的干涉光源容易造成干涉条纹的灰度分布不一致。Kumar 等^[16]用白光光源进行显微干涉测量,利用单片彩色 CCD 相机采集干涉图样,将 RGB 三个通道的光强信息分别提取出来进行表面形貌的再现,但其测量范围受 CCD 本身 RGB 三个通道波长限制。沈邦兴等^[17]用分束片将白光作为光源进行干涉,将得到的干涉条纹进行分束,再用不同带宽的滤光片获得单色光的干涉条纹,用 PIN 光电管接收每个单色光的干涉信号。其优点在于光源位置固定,只需利用几个光电管来同步采集干涉信号,但在这种情况下,光源在不同波长下的光强不一样,就使得干涉条纹的灰度分布差别很大,即人眼看见的亮暗差异明显。周明宝等^[18]论证了光源光强不同容易造成提取的相位信息不准确,进而影响相移和初相位的提取精度。

本文针对多波长显微干涉中光强不一致的问题,设计出一种在白光和多种滤光片组合的多波长显微干涉测量系统中,切换滤光片后光强能自动调节的控制系統。将比例积分微分(PID)控制运用到光强调节中,使得切换不同滤光片后光强快速达到预设值,进而使干涉图样灰度分布基本一致。实验

结果表明,本文方法可以有效调整切换滤光片后的光源亮度,从而得到干涉图样灰度分布一致的图像。

2 理论分析

2.1 多波长干涉测量原理

光强一致性干涉测量系统原理如图 1 所示。光学干涉过程为:白光经准直透镜后变成平行光,经过不同的滤光片后成为单色光;之后单色光经过分光棱镜,一束光进入 Mirau 干涉物镜,在物镜内一半的光到达被测表面反射回来,另外一半的光反射到参考镜上的涂层区再次反射回来;这两束光再次投射到分光棱镜上产生干涉,干涉图像由 CCD 相机采集,CCD 型号为 scA1400-30 gm,分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ 。测量系统包括:计算机控制压电陶瓷(PZT)产生往返运动;PZT 运动方向发生改变的同时驱动滤光片进行切换;光源控制系统在滤光片切换完成后迅速将光源亮度控制在设定值;CCD 采集干涉图样后,利用计算机进行数据处理。考虑到光强传感器实时测量的需求,经过多次测试,发现将其放置在滤光片后面的光强值与放在分光棱镜后面的光强值呈线性关系,因此将传感器固定在分光镜后。

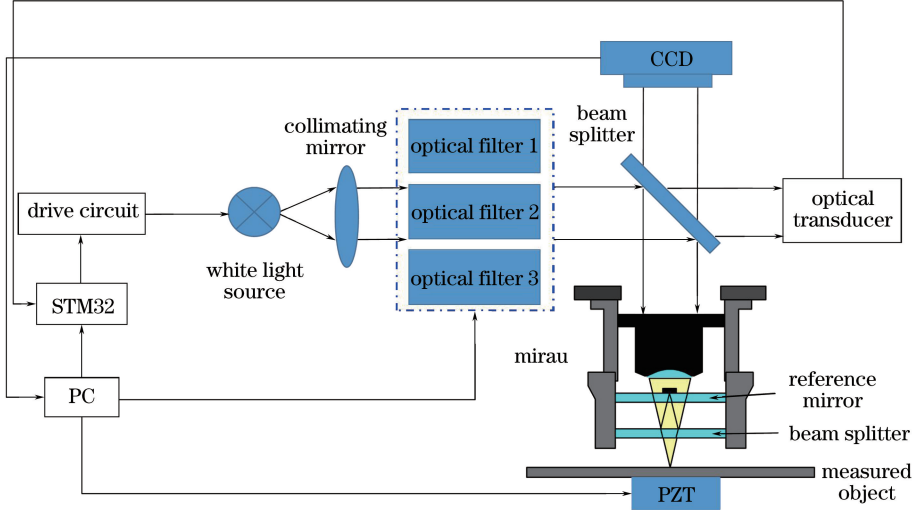


图 1 光强一致性干涉测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of light intensity consistency interferometry system

任意波长的任一幅图像的光强可表示为^[19]

$$I_{\lambda_k i}(x, y) = I_{0\lambda_k}(x, y) + I_{\lambda_k}(x, y) \cos[\phi_{\lambda_k}(x, y) + \theta_{\lambda_k i}], \quad (1)$$

式中: (x, y) 为干涉图中像素点的坐标; λ_k 为第 k 种波长, $k = 1, 2, \dots, M$; i 为波长 λ_k 对应干涉图的序数, $i = 1, 2, \dots, N$; $I_{0\lambda_k}(x, y)$ 为直流光强; $I_{\lambda_k}(x, y)$ 为交流光强幅值; $\phi_{\lambda_k}(x, y)$ 为初始相位; $\theta_{\lambda_k i}$ 为相移驱动量。由(1)式可见,当不同波长的入射光强不一

致时,将会影响 $I_{0\lambda_k}(x, y)$ 和 $I_{\lambda_k}(x, y)$ 。

2.2 光源的光谱特性

本文多波长的获得方式是利用白光光源和中心波长不一样的多种窄带滤光片组合的方式,该方式可以在不切换光源的情况下得到不同的单波长光束。白光 LED 一般具有较宽的光谱范围,图 2 为 THORLABS 公司生产的型号为 LEDW25E 的白光光源光谱图,该白光光源的波长范围为

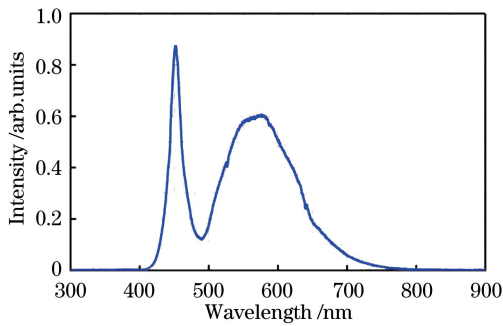


图2 白光光源光谱特性曲线

Fig. 2 Spectral characteristic curve of white light source 430~660 nm。本文选择的三种滤光片的中心波长分别为 $\lambda_1=510$ nm、 $\lambda_2=540$ nm、 $\lambda_3=640$ nm。从图2中可看出, λ_3 强度范围最小, 以 λ_3 为基准, 通过调整光源电压, 使 λ_1 、 λ_2 的强度与 λ_3 一致。这三种波长的光强差异, 会导致在白光光源位置及输入电压固定的情况下, 通过切换不同的波长滤光片使得所产生的干涉图像对应的光强不相同, 在CCD上

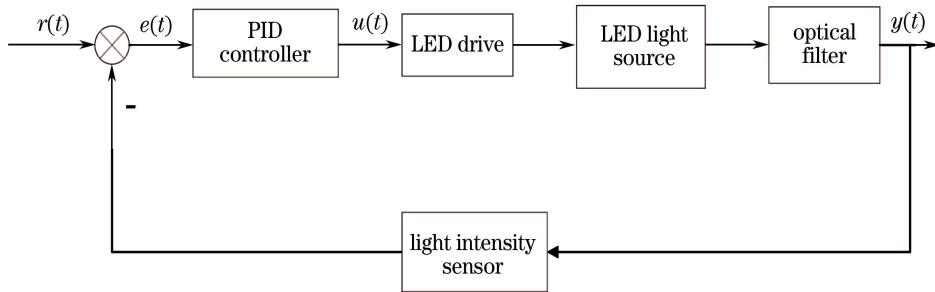


图3 系统控制框图

Fig. 3 System control block diagram

LED 的输入电压范围为 3.2 ~ 5 V, STM32F103RCT6 的 DAC 输出电压范围为 0 ~ 3.3 V。通过放大电路对 3.3 V 电压进行放大处理。利用 LM317 稳压后的最终电压输出范围为 1.25 ~ 7.85 V, 最大电流能达 1.5 A。通过控制 DAC 输出电压, 可实现 1.25 ~ 7.85 V 电压连续可调, 调整精度为 ± 0.01 V, 可以满足使用要求。LED 驱动电路如图 4 所示。

2.4 PID 参数选择

光强控制系统开机后, 立即调整光源的输入电压, 使经滤波片后的出射光照度达到预设值, 这段时间为 t_1 , 波长为 λ_1 ; 当完成 λ_1 的采集后, 将经滤波片后的波长从 λ_1 切换至 λ_2 , 从此时到照度值稳定的时间为 t_2 , 波长为 λ_2 ; 当完成 λ_2 的采集后, 将经滤波片后的波长从 λ_2 切换至 λ_3 , 从此时到照度值稳定的时间为 t_3 , 波长为 λ_3 ; 最后进行 λ_3 的采集。切换过程中光强动态曲线如图 5 所示, 其中 t_1 的长

呈现的干涉图样的亮暗程度差别很大, 造成最终的计算结果存在误差。因此必须保持不同波长的光强一致性, 本文采用光强实时反馈调节对白光经滤波片的干涉光光强进行控制, 以保证不同波长的光强处于相对平衡状态。

2.3 光强控制系统

利用光强传感器 BH1750FVI 检测出光强, 此器件能直接输出光强值, 无需标定。相较于光敏电阻, 集成度高的光强传感器不需要进行模数转换, 很大程度上降低了电路的复杂度^[20]。将转换完成后的电信号输入到 STM32 单片机中, 将设定的光强值 $r(t)$ 与实际的光强值 $y(t)$ 进行比较得到偏差 $e(t)$, 通过数字 PID 控制得出控制量 $u(t)$, 使数/模转换器(DAC)输出合适的电压值, 进而控制 LED 驱动电路, 使每种滤光片出射的光强都能稳定到设定值。观测点的光强信息由 ATK-0.96 OLED 显示模块进行显示。系统控制框图如图 3 所示。

短对系统影响甚微, 而在快速连续采集时, t_2 、 t_3 过长会使 CCD 采集到照度尚未稳定时的干涉图样。

为了使滤波片切换完成后能迅速回到设定值, 在缩短 t_2 与 t_3 的同时不影响采集图片的质量, 有必要引入 PID 控制并寻找合适的 PID 参数。本文利用 STM32 来实现数字 PID 控制, 与传统的硬件 PID 控制相比, 数字 PID 修改参数更为方便, 可以使控制信号直接输出给被控对象而不受干扰, 从而保证了 PID 的控制效果。根据预设照度值 $r(k)$ 与实测值的差值得到偏差值 $e(k)$, $e(k)$ 经过比例、积分以及微分运算后再经过求和得出控制量 $u(k)$ ^[21], 数字 PID 的公式为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)], \quad (2)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

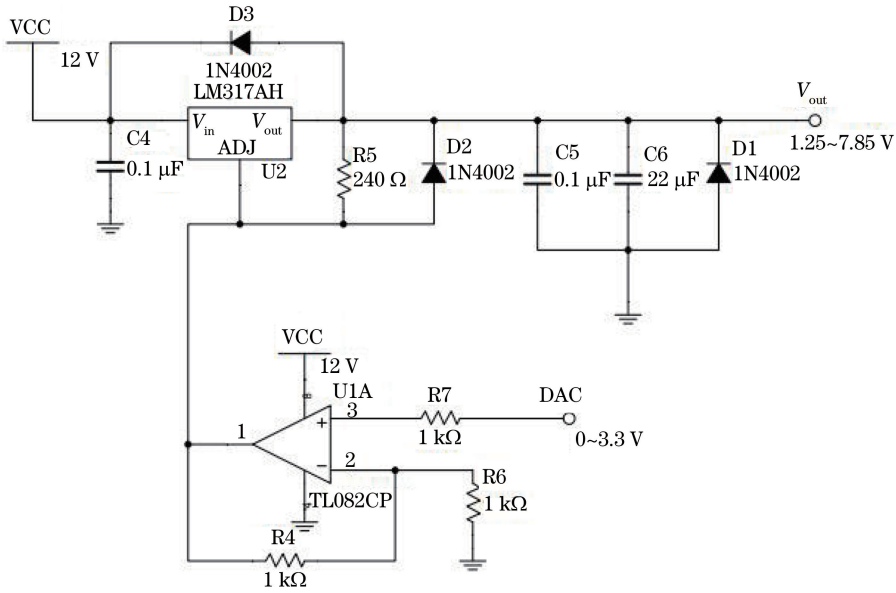


图 4 LED 驱动电路

Fig. 4 LED driving circuit

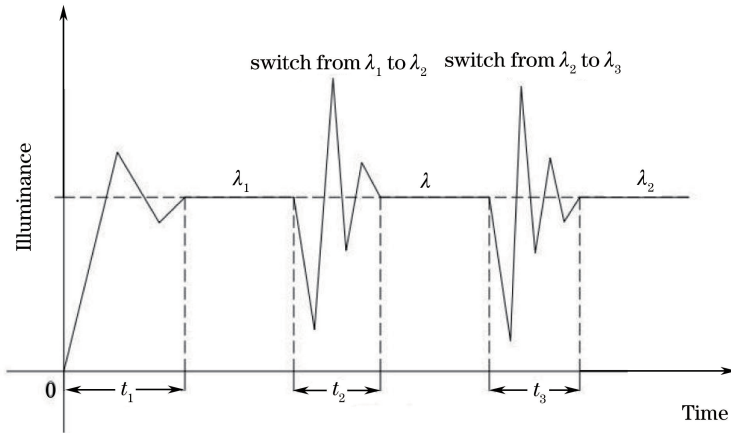


图 5 切换过程中光强动态曲线示意图

Fig. 5 Diagram of light intensity dynamic curve during switching process

与位置式算法相比,增量式算法减少了对偏差值进行累加的繁琐步骤,增量只与最近几次的偏差值有关,且消去了积分项,从而可减少控制器的积分饱和,即便存在精度不足的现象,控制量也不会受到很大影响,于是本文采用增量式算法。由(2)式可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d [e(k-1) - e(k-2)], \quad (3)$$

增量满足

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1), \quad (4)$$

则增量式控制算法可表示为

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]. \quad (5)$$

为方便计算,可将(5)式进一步整理为

$$\Delta u(k) = q_1 e(k) + q_2 e(k-1) + q_3 e(k-2), \quad (6)$$

式中: $\Delta u(k)$ 为 DAC 控制量的增量; $q_1 = K_p + K_i + K_d$, $q_2 = -(K_p + 2K_d)$, $q_3 = K_d$ 。

本系统测试环境为暗室无背景光,环境温度为 25 °C,减小采样周期会缩短测量时间,从而增大光强检测模块的测量误差,于是采样定时器设定为 20 ms,依次确定 K_p 、 K_i 、 K_d 的取值。

图 6 为几种 PID 参数设定下的系统阶跃响应曲线,系统进入稳态后,测得照度数据主要分布在 25 lx 附近,相对误差不足 1%。其中 K_p 取 0.001 时,系统达到临界阻尼状态,完成阶跃响应耗时 1.6 s,且在误差范围内仍有小幅振荡;而 K_p 取

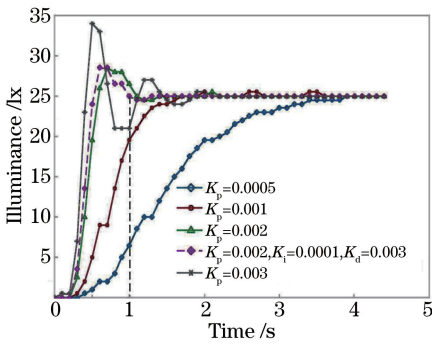


图 6 系统阶跃响应

Fig. 6 System step response

0.002时,完成阶跃响应耗时 1.1 s;继续增大 K_p 会加大超调。另经测试,在 K_p 取 0.002 时引入积分与微分项后,可以缩短调整时间,减小振荡。当 PID 三个参数分别为 $K_p=0.002$ 、 $K_i=0.001$ 、 $K_d=0.003$ 时,

系统的响应速度最快,且稳定性也相对于其他参数要高,取 $\pm 2\%$ 作为误差带,稳定时间为 1 s。综上考虑取 $K_p=0.002$ 、 $K_i=0.0001$ 、 $K_d=0.003$ 。

3 实验结果及分析

3.1 调整时间分析

确定 PID 参数后,由计算机控制滤光片的切换,CCD 相机采集干涉图样,并将数据输入到计算机中进行显示。为确定光强控制系统的调整时间是否满足多波长干涉系统的快速测量需求,需要测量其调整时间,照度从 0 变化至稳定值 12 lx 时 3 种波长的响应时间参数动态曲线如图 7 所示。在 3.5 s 时开始转换滤波片,照度值在 5.7 s 时回到预设值,在 7.5 s 时再次转换滤波片,照度值在 8.9 s 时重新回到预设值。

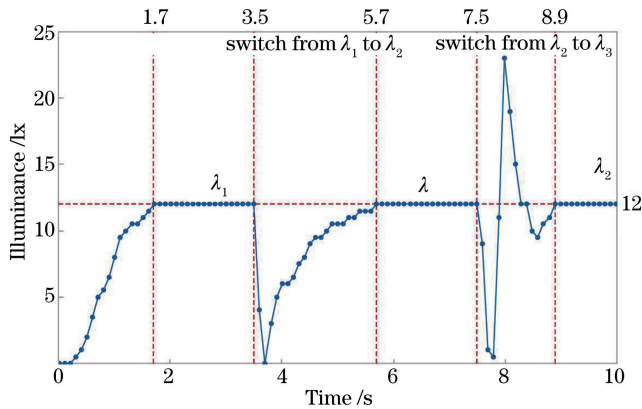


图 7 波长轮换时照度动态曲线

Fig. 7 Illuminance dynamic curve during wavelength rotation

对 t_2 及 t_3 进行多次测量,测量数据如表 1 所示。可以看出所有时间均未超过 2.5 s,满足多波长显微干涉系统的测量要求。

表 1 光强调整时间表

Table 1 Light intensity adjustment schedule

Serial number	t_2/s	t_3/s
1	2.36	1.62
2	2.22	1.62
3	2.30	1.76
4	2.20	1.62
5	2.24	1.70

3.2 干涉图样分析

CCD 采集控制前后的干涉图样如图 8 所示。在干涉测量中,干涉条纹的间距与波长有关,干涉系统会聚角一定时,波长越大,条纹间距越大^[22]。进行光强一致性控制之前,由 CCD 相机采集的三种波

长干涉图的灰度分布差异明显,其中图 8(b)对应的条纹最亮,图 8(c)对应的条纹最暗。

利用 Matlab 软件对每个波长的干涉图样灰度值进行列向求和,得到如图 9 所示的控制前后的垂直灰度投影图。控制前,图 9(a)中三个波长的灰度曲线幅值差相差很大;控制后,图 9(b)的波峰基本在 10000 左右,波谷基本在 3000 左右,灰度分布基本一致。

干涉条纹的可见度^[23]定义为

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}, \quad (7)$$

式中: I_M 和 I_m 分别对应图 9(a)、图 9(b)中不同波长的波峰和波谷的平均灰度值。表 2 列出了控制前、后三种波长的可见度,不同波长干涉图像的对比度误差由控制前的 18% 降低至控制后的 2%。

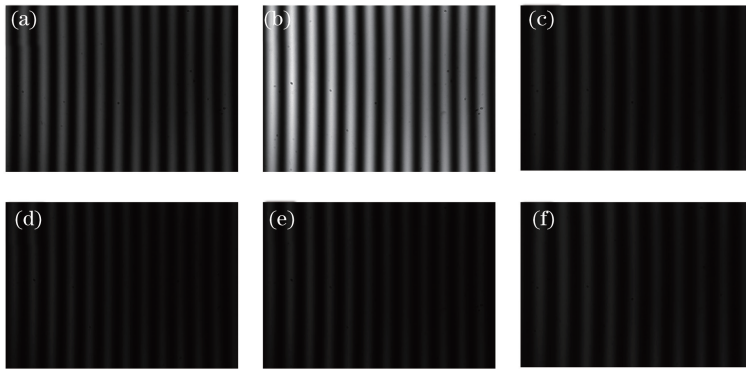


图 8 光强控制前后干涉图。(a)(d)控制前后 510 nm 干涉图;(b)(e)控制前后 540 nm 干涉图;
(c)(f)控制前后 640 nm 干涉图

Fig. 8 Interferograms before and after intensity control. (a)(d) 510 nm interferograms before and after intensity control;
(b)(e) 540 nm interferograms before and after intensity control; (c)(f) 640 nm interferograms before and after
intensity control

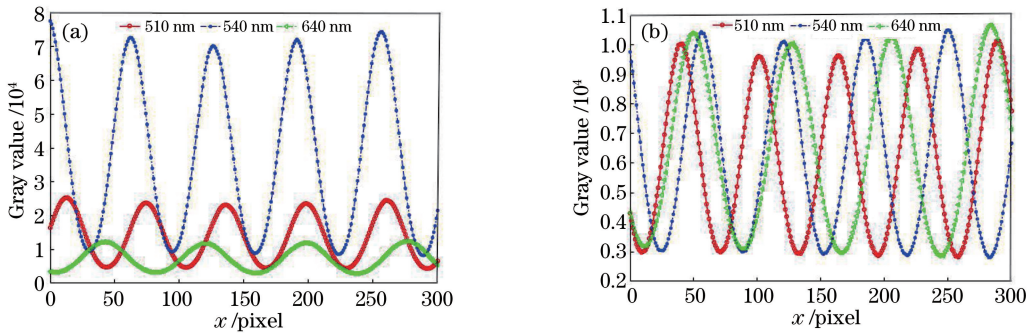


图 9 控制前后的垂直灰度投影图。(a)控制前;(b)控制后

Fig. 9 Vertical grayscale projections before and after intensity control. (a) Before intensity control;
(b) after intensity control

表 2 三波长干涉图像可见度

Table 2 Visibility of three-wavelength interference image

Wavelength /nm	Before intensity control			After intensity control		
	Maximum gray value	Minimum gray value	K	Maximum gray value	Minimum gray value	K
510	24077	4548	0.68	9860	2919	0.54
540	72338	9020	0.78	10345	2929	0.56
640	11996	3017	0.60	10360	3027	0.55

4 结 论

提出一种解决多波长干涉测量中光强不一致的控制方法,对波长为 510 nm、540 nm 以及 640 nm 组合的多波长进行实验。从调整时间和灰度分布两个角度分别进行评价,本文方法能使滤光片从开始切换到稳定的时间不超过 2.5 s,对比校正前的灰度直方图,校正后三个波长干涉图样的灰度直方图的灰度分布基本一致。该装置结构简单、调整方便,能极大地缩减多波长干涉测量系统的成本,可以广泛应用于工业在线测量领域。

参 考 文 献

- [1] Guo T, Li F, Ni L F, et al. Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212003.
郭彤, 李峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212003.
- [2] Axinte D A, Gindy N, Fox K, et al. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining [J]. International Journal of Machine Tools

- and Manufacture, 2004, 44(10): 1091-1108.
- [3] Lee H S, Shin S, Lee H, et al. Determining the micro-optical element surfaces profiles using transmission deflectometry with liquids[J]. Current Applied Physics, 2015, 15(3): 302-306.
- [4] Zuluaga-Ramírez P, Frövel M, Belenguer T, et al. Non contact inspection of the fatigue damage state of carbon fiber reinforced polymer by optical surface roughness measurements [J]. NDT & E International, 2015, 70: 22-28.
- [5] Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, et al. High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0604001.
邓钦元, 唐燕, 周毅, 等. 基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0604001.
- [6] Shi T, Zang Z M, Liu D, et al. Retrace error correction for non-null testing of optical aspheric surface [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812006.
师途, 臧仲明, 刘东, 等. 光学非球面面形非零位检测的回程误差校正[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812006.
- [7] Zhao X H, Qu X H, Ye S H, et al. Optic testing methods and instruments for MEMS [J]. Optical Technology, 2003, 29(2): 197-200.
赵旭辉, 曲兴华, 叶声华, 等. MEMS 的光学检测方法 and 仪器[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 197-200.
- [8] Lyu S, Nguyen D C, Kim D, et al. Experimental drag reduction study of super-hydrophobic surface with dual-scale structures [J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 206-211.
- [9] Lee J M, Lee S H, Ko J S. Dynamic lateral adhesion force of water droplets on microstructured hydrophobic surfaces[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 213: 360-367.
- [10] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
- [11] Dong Y F, Wan X J, Meng H, et al. Fast and stable white light interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051203.
董一帆, 万新军, 孟涵, 等. 快速稳定的白光干涉测量法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051203.
- [12] O'Mahony C, Hill M, Brunet M, et al. Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(10): 1807-1814.
- [13] Grigg D, Felkel E, Roth J, et al. Static and dynamic characterization of MEMS and MOEMS devices using optical interference microscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5455: 429-435.
- [14] Zhou L. Study on phase shift drive and identification method of surface topography multiwavelength interferometry [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.
周立. 表面形貌多波长干涉测量中相移驱动及识别方法的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
- [15] Hata S, Hayashi J, Ishimaru I, et al. Nano-level 3-D measurement system using 3-wavelength laser light interference [C] // 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, July 13-16, 2008, Daejeon, Korea. New York: IEEE, 2008: 10203123.
- [16] Kumar U P, Wang H F, Mohan N K, et al. White light interferometry for surface profiling with a colour CCD[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(8): 1084-1088.
- [17] Shen B X, Wang W, Zhang H B. Multi-wavelength interferometry for nanometer scale spacing [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(Supp.): 103-108.
沈邦兴, 汪威, 张海波. 纳米级微间距的多波长干涉测量方法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(Supp.): 103-108.
- [18] Zhou M B, Lin D J, Guo L R, et al. Error analysis on two wavelength white light phase shifting interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 106-113.
周明宝, 林大键, 郭履容, 等. 基于白光的双波长相移干涉的误差分析[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 106-113.
- [19] Zhai Z S, Zhang Y H, Wang X Z, et al. Alignment of the initial phase during multiple-wavelength switching in microscopic interferometry [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 493-499.
- [20] Zhou J Z, Yang M. Design of light intensity monitoring system based on ARM Cortex-M3 [J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2018, 24(3): 69-71, 95.

- 周金芝, 杨明. 基于 ARM Cortex-M3 光强监测系统
设计[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2018,
24(3): 69-71, 95.
- [21] Xing S R, Zhuang Y, Liang G H. Illumination intensity
control system based on PID[J]. Computer & Digital
Engineering, 2010, 38(5): 70-73.
邢思锐, 庄严, 梁国泓. 基于 PID 控制的照度自动控
制系统[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(5): 70-
73.
- [22] Zhou D L, Huang D Z. Analysis of the interference
fringes and adjustment of Michelson interferometer[J].
Physical Experiment of College, 2008, 21(2): 16-18.
周达林, 黄笃之. 迈克耳逊干涉仪干涉条纹分析及调
整[J]. 大学物理实验, 2008, 21(2): 16-18.
- [23] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 3rd ed.
Beijing: China Machine Press, 2011: 345-346.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 3 版. 北京: 机械工
业出版社, 2011: 345-346.