

文章编号: 1001-3806(2016)03-0392-05

## 基于波数扫描干涉的表面轮廓测量

何艳敏<sup>1</sup>, 谢创亮<sup>1</sup>, 许卓明<sup>1</sup>, 鲍 鸿<sup>1\*</sup>, 叶双莉<sup>2</sup>, 周延周<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 武汉大学 微电子与信息技术研究院, 武汉 430072)

**摘要:** 为了高精度测量被测物体表面3维轮廓, 采用半导体激光器波数扫描干涉的方法, 对激光波数扫描干涉进行了理论分析和实验验证。在迈克尔逊干涉系统的参考端引入一个光楔, 通过2-D傅里叶变换提取光楔干涉图像的相位, 在线检测激光器输出波数变化, 最后对所有时间分辨干涉图像序列进行随机采样傅里叶变换, 还原被测物体表面3维轮廓。结果表明, 轮廓测量精度达到 $\pm 6.7\text{nm}$ 。该方法特别适合于机械零件的质量检验。

**关键词:** 激光技术; 轮廓测量; 波数扫描; 半导体激光器; 随机采样傅里叶变换

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.019

### Profilemetry measurement based on wavenumber scanning interferometry

HE Yanmin<sup>1</sup>, XIE Chuangliang<sup>1</sup>, XU Zhuoming<sup>1</sup>, BAO Hong<sup>1</sup>, YE Shuangli<sup>2</sup>, ZHOU Yanzhou<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Institute of Microelectronics and Information Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to measure 3-D profile of a sample with high accuracy, wavenumber-scanning interferometry was used. An optical wedge was used as reference terminal of a Michelson interferometer system. The phases of wedge interference image were extracted by 2-D Fourier transform. The changes of output wavenumber were detected on line. Finally, all the time-resolved interferometry image sequences were sampled by Fourier transform random. The 3-D contour of object surface was restored with high precision. The profile of a sample object was constructed with the resolution of  $\pm 6.7\text{nm}$ . The proposed method is particularly suitable for quality inspection of mechanical parts.

**Key words:** laser technique; profile measurement; wavenumber scanning; diode laser; random sampling Fourier transform

### 引言

光学3维轮廓测量技术具有精度高、速度快、非接触等优点, 广泛应用于机器视觉、质量控制、现代制造系统等方面<sup>[1-3]</sup>。波数扫描干涉(wavenumber scanning interferometry, WSI)是最近发展起来的新型干涉测量方法<sup>[4-5]</sup>。早在1980年, 日本的ISHII提出半导体激光器波数扫描干涉方案<sup>[6]</sup>用于距离测量。2004年, SHEN提出波长/相移干涉步长标定方法<sup>[7]</sup>, 这是波数扫描干涉技术成熟的标志。2004年前后, RUIZ<sup>[5]</sup>, ZHOU<sup>[8]</sup>等人把波数扫描干涉技术用于位移和应变测量。RUIZ和DAVILA等人调节激光波长使其以恒定速率扫描, 从而获得在时间上离散的光强干涉序列, 沿

着时间轴对光强分布做傅里叶变换, 重建出被测物体各反射表面的信息<sup>[9-12]</sup>。2013年, XU<sup>[13]</sup>等人提出单光楔在线波数扫描检测方法, 理论上波数扫描干涉的测量精度可达 $\pm \lambda/5000\text{nm}$ , 其中 $\lambda$ 为波长。

本文将这种测量原理延拓到了表面轮廓测量方面。半导体激光器波数扫描时, 通过CCD相机拍摄迈克尔逊型干涉仪3个平面, 产生反射干涉图像, 利用傅里叶变换和相位解卷绕技术<sup>[14]</sup>, 高精度测量被测物体表面3维轮廓。该系统具有测量精度高、结构简单、可靠性高和抗干扰能力强等特点, 特别适合于机械零件的质量检验。

### 1 表面轮廓测量系统的构成

本文中测量系统采用迈克尔逊型干涉, 如图1所示, 它由半导体激光器(laser diode, LD)、分光棱镜(cube beam splitter, CBS)、玻璃光楔(optical wedge, OW)、CCD相机以及被测物体组成。其中激光是半导体激光器产生, 无模跳的波长调制范围可达1.5nm, 由激光控制器ILX Lightwave LDC-3724C控制激光器温度扫描实现; 光楔材料为BK7玻璃, 在( $x = 0\text{mm}, y =$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51371129; 11174226); 广东省自然科学基金资助项目(1414050002003); 广州市科技计划资助项目(2014J4100203)

作者简介: 何艳敏(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事3-D机器视觉的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: bhong@gdut.edu.cn

收稿日期: 2015-04-14; 收到修改稿日期: 2015-05-12

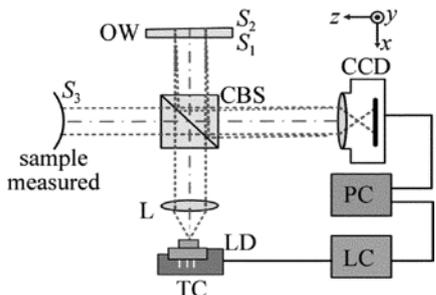


Fig. 1 Schematics of profile measurement system, TC—laser mount; LC—laser controller; L—convex lens; PC—personal computer; S<sub>3</sub>—sample measured

0mm)处,厚度为 6.003mm,倾角为 6',用于波数检测和干涉参考面<sup>[13]</sup>;CCD 相机是 PCO1600 高精度 14 位制冷相机,空间分辨率为 1600pixel × 1200pixel,拍摄帧频为 16frame/s。

测量系统工作原理如图 1 所示,光源发出的波数调制激光经过透镜 L 准直后,被分光棱镜 CBS 分成两束光,其中一束在光楔前后面 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 产生反射,另一束被被测物体表面 S<sub>3</sub> 反射。这 3 束反射光叠加形成干涉,经透镜清晰成像在 CCD 相机的像平面上。图 1 中激光器 LD 的工作温度随时间变化,温度调制激光器输出波长,激光控制器控制激光器输出光进行波数扫描,与此同时 CCD 相机采集 N 张干涉图像,计算机对 N 张干涉图像的每个像素点沿时间轴提取干涉光强序列,然后对其进行数据处理。

## 2 表面轮廓测量原理

### 2.1 激光波数扫描

当线性调制激光波长时,输出光波长为:

$$\lambda(t) = \lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{T}t, \left( t \in \left[ -\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \right] \right) \quad (1)$$

式中,λ<sub>c</sub> 为激光波数中心,Δλ 为激光波数扫描最大变化量,t 为波数扫描时间,T 为波数扫描周期,输出光波数 k(t) 为:

$$k(t) = \frac{2\pi}{\lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{T}t} \quad (2)$$

对(2)式泰勒展开,可得:

$$k(t) \approx \frac{2\pi}{\lambda_c} - \frac{2\pi \cdot \Delta\lambda}{\lambda_c^2}t + \frac{4\pi \cdot \Delta\lambda^2}{\lambda_c^3}t^2 - \frac{6\pi \cdot \Delta\lambda^3}{\lambda_c^4}t^3 + \dots \quad (3)$$

忽略 2 阶以上高阶无穷小,(3)式可以化简为:

$$k(t) = k_c + \frac{\Delta k}{T}t \quad (4)$$

式中,k<sub>c</sub> = 2π/λ<sub>c</sub> 为中心波数,Δk = -2πΔλ/λ<sub>c</sub><sup>2</sup> 为波数扫描范围。如 Δk 很小,激光器输出波数可以看作

随时间呈线性变化。但实际工作中,以下 2 个因素所带来的激光输出波数非线性不能忽略:(1)随着波数扫描范围的增加,(4)式线性化处理会引入较大的非线性误差;(2)实际工作中,温度控制扫描,产生激光波数的输出扫描,而温度扫描往往伴有较强的非线性,因此激光器波数扫描非线性强。为了解决激光器输出波数的非线性因素,需要对波数检测,采用的方法是在迈克尔逊干涉系统的参考端引入一个光楔,通过 2-D 傅里叶变换提取光楔干涉图像的相位,在线检测激光器输出波数变化,由于光楔前后面 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 的光程差 Δ<sub>120</sub> 要远小于被测物体表面的光程差 Δ<sub>13</sub>,因此光楔信号的频率位于低频带上,而被测物体表面的信号频率则在高频带内,系统中充分利用这两个频率带的信息,一方面利用光楔信号的低频带信息来监视激光器的输出波数 k(n) 来消除激光器输出波长漂移误差,另一方面利用被测物体表面信号的高频带信息来获得被测物体的表面轮廓,使用随机采样傅里叶变换<sup>[13]</sup> 进行数据处理。

### 2.2 在线检测激光波数

本节中将给出通过光楔在线检测激光器波数的方法。设 CCD 相机拍摄 N 张干涉图片,光楔前后面 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 的干涉图像为:

$$I(x, y, k) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos\left[2\pi \cdot \frac{\Lambda_{12}(x, y)}{\pi} \cdot k(n)\right] \quad (5)$$

式中,光强 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> 分别为面 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 的反射光强,Λ<sub>12</sub> 为面 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 的光程差,k(n) 为波数 k(t) 的离散化表达式,n 为 CCD 相机拍摄的干涉图片张数,且 n = 1, 2, ..., N。

由于测量系统中的光楔前后面 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 彼此线性倾斜,故 Λ<sub>12</sub> 为:

$$\Lambda_{12}(x, y) = \Lambda_{120} + \Delta\Lambda_{12x} \cdot x + \Delta\Lambda_{12y} \cdot y \quad (6)$$

式中,Λ<sub>120</sub> = 9.064mm 为光楔在 x = 0mm, y = 0mm 时的光程差,ΔΛ<sub>12x</sub>, ΔΛ<sub>12y</sub> 分别为沿 x 和 y 方向的光程差变化率。

对(5)式做 2 维傅里叶变换:

$$\hat{I}(u, v) = (I_1 + I_2) \cdot \delta(u, v) + \sqrt{I_1 I_2} \cdot \left\{ \delta[u + \Omega_{12u}(n), v + \Omega_{12v}(n)] \exp[-j\psi_{12}(n)] + \delta[u - \Omega_{12u}(n), v - \Omega_{12v}(n)] \exp[j\psi_{12}(n)] \right\} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \Omega_{12u}(n) = \frac{\Delta\Lambda_{12x}}{\pi} \cdot k(n) \\ \Omega_{12v}(n) = \frac{\Delta\Lambda_{12y}}{\pi} \cdot k(n) \\ \psi_{12}(n) = 2 \cdot \Lambda_{120} \cdot k(n) \end{cases} \quad (8)$$

式中,u 和 v 为光楔前后表面干涉的空间频率;δ 为 2

维狄拉克函数;  $\Omega_{12u}$  和  $\Omega_{12v}$  为 2 维傅里叶变换幅频峰值处的频率位置,  $\psi_{12}$  为 2 维傅里叶变换幅频峰值处的相位。

对 CCD 相机采集到的每一张干涉图像做 2 维傅里叶变换, 识别光楔前后面的干涉峰值, 提取其干涉峰值的卷绕相位, 得到一组随时间变化的卷绕相位, 如图 2a 所示。如图 2b 所示, 经过相位解卷绕, 得到激光器的输出波数  $k(n)$  :

$$k(n) = \frac{\psi_{12}(n)}{2 \cdot \Lambda_{120}} \quad (9)$$

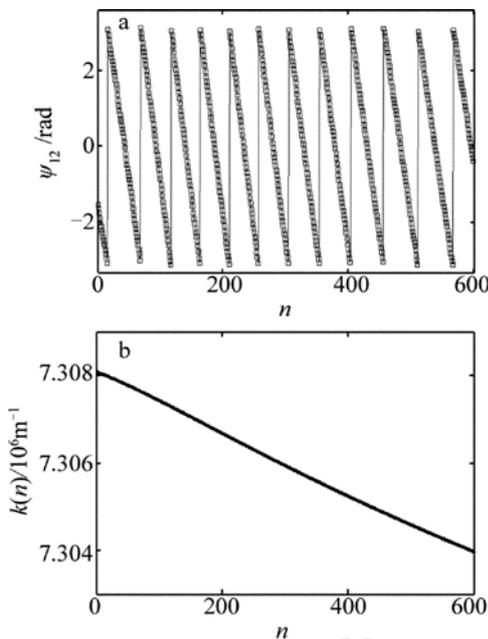


Fig. 2 a—wrapped phase series at the peak of  $\Lambda_{12}$  b—laser wavenumber series

### 2.3 被测物体表面轮廓的数据解调

如图 1 所示, CCD 相机采集到的三表面时间序列干涉光强为:

$$I(x, y, t) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sqrt{I_p(x, y) \cdot I_q(x, y)} \cdot \cos[\Phi_{pq}(x, y, t)] \quad (10)$$

式中,  $p, q$  分别表示被测物质的表面  $p$  和表面  $q$ ; 光强  $I_1, I_2$  和  $I_3$  分别为面  $S_1, S_2$  和  $S_3$  的反射光强;  $p < q = 1, 2, 3$ ;  $\Phi_{12}, \Phi_{13}$  以及  $\Phi_{23}$  分别为  $S_1$  与  $S_2, S_1$  与  $S_3, S_2$  与  $S_3$  之间的相位差, 其表达式如下:

$$\Phi_{pq}(x, y, t) = 2\pi f_{pq}(x, y)t + \psi_{pq}(x, y) \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} f_{pq}(x, y) = \frac{\Lambda_{pq} \Delta k}{\pi T} \\ \Lambda_{pq} = n_{pq} z_{pq}(x, y) \\ \psi_{pq}(x, y) = 2\Lambda_{pq} \cdot k_c \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $p < q = 1, 2, 3$ ;  $f_{pq}, \Lambda_{pq}, \psi_{pq}$  和  $n_{pq}$  分别为面  $S_p$  与面

$S_q$  之间的干涉频率、光程差、干涉相位和折射率, (11) 式和(12)式表明, 通过求解干涉频率和相位可以得到被测表面的轮廓信息  $\Lambda_{pq}$ 。因此本文中将通过傅里叶变换算法解调干涉相位, 从而得到被测表面的轮廓信息。

考虑到第 2.1 节中的波数线性化处理时存在非线性误差, 同时 CCD 相机采样间隔也存在非线性因素, 因此对时域干涉光强的频域分析需通过随机采样傅里叶变换如下<sup>[13]</sup> :

$$\tilde{I}(x, y, f) = \sum_{n=1}^N I[x, y, k(n)] \cdot w[k(n)] \cdot \exp[-j2\pi f k(n)] \quad (13)$$

式中,  $w[\ ]$  为波数扫描过程中的窗口采样函数,  $k(n)$  为  $k(t)$  的离散化表达式, 是波数  $k(t)$  的检测结果。其幅频有 3 个峰值, 分别对应面  $S_1$  和面  $S_2$ , 面  $S_1$  和面  $S_3$ , 面  $S_2$  和面  $S_3$  的时间序列干涉光强; 峰值处所对应的相位为  $\psi_{pq}(x, y)$  的卷绕相位。

选择光楔的后表面  $S_1$  为参考面, 其与被测面  $S_3$  的中介介质为空气, 折射率可认为 1。于是被测面的高度信息可以通过下式确定:

$$z_{13}(x, y) = \frac{\psi_{13}^{uw}(x, y)}{2k_c} \quad (14)$$

式中,  $\psi_{13}^{uw}$  为  $S_{13}$  峰值处的空间解卷绕相位, 上标 uw 表示相位解卷绕运算。由于光楔前表面  $S_1$  平整度小于  $\lambda/20$ , 且 (0mm, 6.2mm) 点为参考零点, 因此  $z_{13}$  是被测物体在视场范围内的表面轮廓。

### 3 实验测量结果

实验中被测物体为苹果 iPad Air 的 logo, 如图 3 所示, CCD 相机共拍摄  $N = 600$  帧波数扫描干涉图像。图 4a 为其中一帧全场干涉图像, 可以看出干涉图像在空间的光强分布相当不均匀。图 4b 和图 4c 为空间位置 (3.9mm, 5.8mm) 处的时间序列干涉光强和幅频图, 其中图 4c 中横坐标  $\Lambda$  表示表面  $S_p$  和表面  $S_q$  ( $p < q, q = 1, 2, 3$ ) 的光程差, 纵坐标  $A_m$  表示光强序列经过傅里叶变换后的幅值。三表面干涉峰值很清楚。

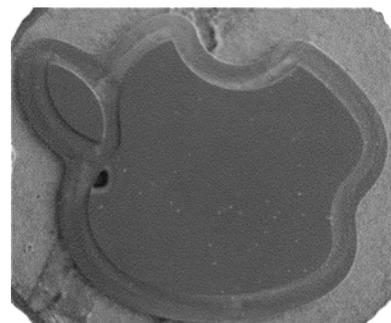


Fig. 3 The measured sample: iPad Air logo

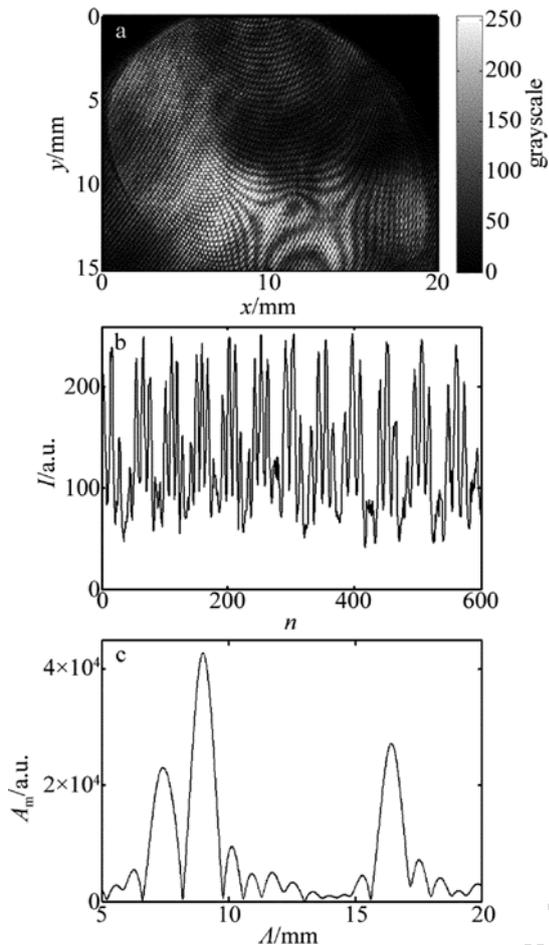


Fig. 4 a—interference pattern b—interference intensity series and its amplitude spectrum at 3.9mm c—interference intensity series and its amplitude spectrum at 5.8mm

将干涉图像的每一个像素点时间序列光强做傅里叶变换后,在每个像素对应被测表面  $S_3$  与光楔前表面  $S_1$  干涉信号的幅频峰值处提取相位,得到全视场卷绕相位图,如图 5 所示,图中色柱表示卷绕相位。

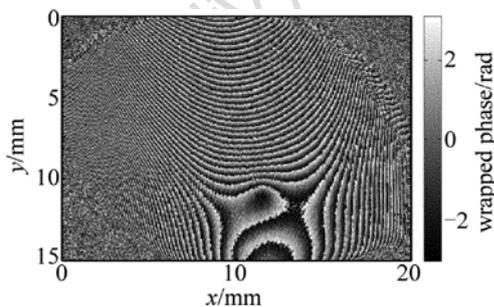


Fig. 5 Wrapped phase at the peak of  $A_{13}$  in amplitude spectrum

对图 5 卷绕相位进行空间解卷绕运算<sup>[15]</sup>,解卷绕的坏点由自然邻点插值处理。本文中测量系统的激光器工作的中心波数  $k_c = 7.306 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,代入(14)式,被测苹果 logo 表面 3 维轮廓如图 6 所示,图中色柱表示像素点在空间  $z$  轴方向的高度。可以看出,苹果 logo 表面的局部 3 维轮廓近似马鞍状,起伏达到  $52 \mu\text{m}$ 。重复上述实验 5 次,视场内轮廓测量的最大偏差分布

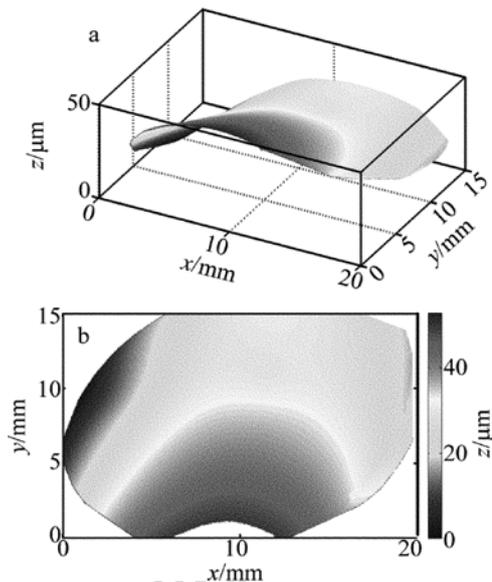


Fig. 6 Local profile of iPad Air logo  
a—3-D image b—2-D image

如图 7 所示,图中色柱表示像素点的测量误差。根据标准差公式(15)式,计算出被测物体表面的轮廓测量精度为  $\pm 6.7 \text{ nm}$ 。

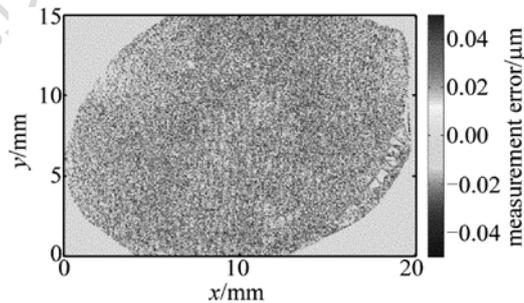


Fig. 7 Measurement error distribution of local profile of iPad Air logo

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mh} \sum_{i=1}^{mh} (E_i - \mu)^2} \quad (15)$$

式中,  $\sigma$  为被测物体表面的轮廓测量精度,  $m$  和  $h$  为 CCD 相机视场的大小,  $E_i$  为局部轮廓的测量误差值,  $\mu$  为局部轮廓测量误差的平均值。

#### 4 结 论

本文中提出了利用半导体激光器波数扫描、三表面迈克尔逊干涉测量表面轮廓的新方法。前两个干涉表面提供干涉的参考面,干涉图像序列采用频分复用原理,低频带用于波数监视,使得激光器输出的波数非常准确,基本可以忽略波长漂移带来的测量误差,从而获得非常高的测量精度;高频带用于表面轮廓测量,通过不等间距傅里叶变换将时域干涉图像序列变换到频域上,解调出被测物体表面的卷绕相位,解卷绕后,高精度测量出被测物体表面的 3 维轮廓。这种方法的优点为:(1)充分利用了干涉图像序列的各个频率带,使

得 3 维轮廓测量精度高,达到  $\pm 6.7\text{nm}$ ; (2) 结构简单, 稳定可靠, 抗干扰能力强; (3) 不需经常实时校验, 不需参考曲面, 对不同曲面轮廓保持很高的测量精度。

总之, 本文中提出的基于波数扫描干涉的表面轮廓测量方法, 在 3 维轮廓测量领域具有广阔的应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] YANG C P, LIU J B, TAGN H Y, *et al.* Measurement of radial distortion based on frequency integration phase demodulation [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 402-405 (in Chinese).
- [2] ZHAG H X. Study on building modeling based on 3-D laser scanning technology [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 431-434 (in Chinese).
- [3] SONG X H, JIN X Z, CHEN S Q, *et al.* Progress of laser-arc hybrid welding and its applications in automotive body manufacture [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 259-264 (in Chinese).
- [4] DECK L L. Fourier-transform phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2354-2365.
- [5] RUIZ P D, ZHOU Y Z, HUNTLEY J M, *et al.* Depth-resolved whole-field displacement measurement using wavelength scanning interferometry [J]. *Journal of Optics*, 2004, A6(10): 679-683.
- [6] ISHII Y, CHEN J, MURATA K. Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(4): 233-235.
- [7] SHEN Y J, HUNTLEY J M. Simple method to calibrate phase modulators for use in dynamic phase-shifting interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 2998-3002.
- [8] ZHOU Y Z, WILDMAN R D, HUNTLEY J M. Improved measurement of grain-wall contact forces in granular beds using wavelength scanning interferometry [J]. *Journal of Optics*, 2005, A7(6): S453-S459.
- [9] RUIZ P D, HUNTLEY J M, WILDMAN R D. Depth-resolved whole-field displacement measurement by wavelength-scanning electronic speckle pattern interferometry [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19): 3945-3953.
- [10] DAVILA A, HUNTLEY J M, PALLIKARAKIS C, *et al.* Simultaneous wavenumber measurement and coherence detection using temporal phase unwrapping [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(5): 558-567.
- [11] DAVILA A, HUNTLEY J M, PALLIKARAKIS C, *et al.* Wavelength scanning interferometry using a Ti:sapphire laser with wide tuning range [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1089-1096.
- [12] CHAKRABORTY S, RUIZ P D. Measurement of all orthogonal components of displacement in the volume of scattering materials using wavelength scanning interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2012, A29(9): 1776-1785.
- [13] XU J, LIU Y, DONG B, *et al.* Improvement of the depth-resolution in the depth-resolved wavenumber-scanning interferometry using multiple uncorrelated wave-number bands [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4890-4897.
- [14] HUNTLEY J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(16): 3268-3270.
- [15] HUNTLEY J M. Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum-cost-matching algorithm [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(15): 5100-5108.