

doi:10.3788/gzxb20154403.0309001

一种提高时间平均数字全息测振条纹模式 对比度的方法

肖文,张旭红,潘锋,丛琳,李艳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:针对基于时间平均数字全息法的微振动原位检测,提出了一种有效提高振动条纹模式对比度的方法,进而可准确获得待测面振幅分布.首先针对实际振动过程中物体存在纵向微位移而引起的相位误差进行校正;然后去除记录过程中物光场散斑引起的相位噪音,有效提高了被第一类零阶贝塞尔函数调制的条纹对比度;最后利用第一类零阶贝塞尔函数的变化规律和条纹级数,定量估计全场的振幅分布.搭建了以声波作为激励源的时间平均全息测振实验系统,采用频率分别为 0、1 100、2 000 和 9 000 Hz 的正弦声波激励簧片进行实验验证.结果表明,以振动频率 2 000 Hz 为例,本方法能够有效提高振动调制条纹质量,并计算得到三级零点处的振幅值分别为 109.4 nm、244.2 nm、356.4 nm,与理论值相比较,误差分别为 6.31%、3.34% 和 3.78%,在允许范围之内,证明了该方法的有效性.

关键词:全息应用;时间平均法;贝塞尔函数;簧片;条纹模式;高对比度显示;振幅分布

中图分类号:O438.1;TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0309001-5

A Method to Improve Fringe Contrast in Time-average Digital Holography for Vibration Measurement

XIAO Wen, ZHANG Xu-hong, PAN Feng, CONG Lin, LI Yan

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A new algorithm was proposed to improve vibration-related fringes contrast for micro-vibration online detection based on time-average digital holography. First, phase change arising from the longitudinal micro-displacement of the object during vibrating process was corrected. Then phase noise caused by speckle noise was eliminated, and thus fringes pattern contrast that modulated by Bessel function was improved effectively. Finally, the amplitude distribution of the measuring surface was estimated according to Bessel function and fringe progressions. An experimental system based on time-average digital holographic interferometry was proposed for micro-vibration measurement that acoustic wave was used for excitation source. The experiment was verified by the reed that excited at the sinusoidal frequency of 0, 1 100, 2 000 and 9 000 Hz, respectively. The result based on vibration frequency of 2 000 Hz shows that the proposed method can improve vibration-related fringes contrast effectively. Amplitude of three-order zero points are 109.4 nm, 244.2 nm and 356.4 nm, and errors are 6.31%, 3.34% and 3.78%, respectively, compared with theoretical values, which demonstrate the effectiveness of the method within the allowable range.

Key words: Holographic applications; Time-average; Bessel functions; Reed; Fringe pattern; High-contrast displays; Amplitude distribution

OCIS Codes: 090.1995;090.2880;090.5694

基金项目:国家自然科学基金(No.61177006)资助

第一作者:肖文(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为数字全息三维成像与相干检测. Email:xiaow@buaa.edu.cn

通讯作者:张旭红(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字全息检测技术. Email:zhang_xh@aspe.buaa.edu.cn

收稿日期:2014-09-17;录用日期:2014-11-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在航空、航天工业及现代机械制造等领域,对精密仪器微振动开展原位检测是工程应用中的迫切需求.但环境噪音、物体表面粗糙度等因素会影响测量准确度.目前常用的加速度传感器^[1]、应变片^[2]法带来附加质量会改变被测物体的固有振动特性.光学探测方法主要有激光多普勒法^[3-4]、散斑法^[5-6]、莫尔条纹法^[7-8].激光多普勒法技术成熟、测量准确度高,但无法实现面振动的探测;散斑法测量简单,但结果极易受外界环境影响,且测量范围小;莫尔条纹法的振幅测量分辨率可达光栅常量的二十分之一以上,但抗干扰性差.时间平均^[9]数字全息^[10-12]干涉测量技术具有非接触、全视场等特点,可以对振动模态进行定量分析,非常适用于面微振动测量.该方法利用一张全息图记录物体在多个振动周期内的运动状态,即再现物光场为被第一类零阶贝塞尔函数^[13-14](以下简称贝塞尔函数)调制(呈亮暗交替变化)的物体振幅像,然后通过贝塞尔函数的变化规律和条纹模式的级数获得振动信息.但是,在实际应用中存在两方面原因影响测振准确度;1)由于照明光与物体反射光(即物光)之间存在夹角,在振动时有纵向微小位移,使再现物光场产生一个相差;2)由于物体表面反射率和粗糙度的不均匀性,使得再现的振动条纹模式模糊,在利用贝塞尔函数计算振幅分布时往往得不到满意的结果.

针对第一个问题,昆明理工大学的钱晓凡等^[15]利用贝塞尔函数的相位特点在一定程度上消除了相位误差的影响,但该方法无法得出任意一点的振幅值;针对第二个问题,法国鲁昂力学实验室的 Dan N Borza^[16-17]利用静止状态下再现物光场通过实、虚部共轭相乘并归一化降低了振动状态下再现物光场的高频乘性相位噪音,提高了条纹模式的对比度,但是没有考虑到相位误差的影响.

本文综合考虑两方面因素的影响,提出一种能够准确测量物体振幅分布的时间平均数字全息测振方法.首先通过对振动再现物光场的相位误差进行校正,然后消除高频乘性相位噪音的影响,得到高对比度的条纹模式,使得测量振幅分布的曲线更准确;最后根据贝塞尔函数绝对值的变化规律及条纹的级数定量计算全场的振幅分布.

1 基本原理

图1为时间平均法的全息记录示意.待测物体一端固定,另一端在正弦激励下作简谐振动.设 P 点为待测物体上的任意一点,照明光照射到该点,参考光与物体反射的光即物光 $O(x, y)$ 在 CMOS 相机光敏面上相干叠加.

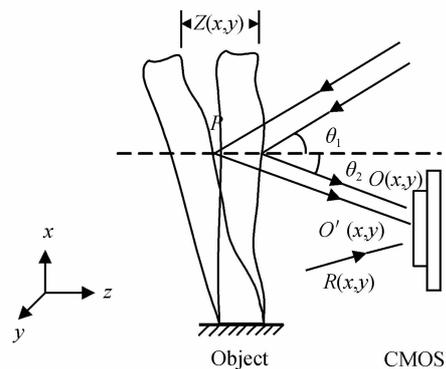


图1 时间平均全息记录示意图

Fig. 1 Sketch map of recoding time average hologram

设参考光为平面波,考虑到记录距离远大于相机光敏面尺寸,物光也近似为平面波,则静止状态下的再现物光场为

$$U_i = R_0^2 O(x, y) \quad (1)$$

式中, R_0 为参考光在记录面的强度分布.

当物体做简谐振动时, P 点反射的物光 $O'(x, y)$ 与参考光 $R(x, y)$ 相干叠加.若 CMOS 相机的曝光时间远大于物体的振动周期 T ,则全息图为物光在曝光时间内的积分强度与参考光的相干图像.此时,振动状态下的再现物光场为

$$U_i = R_0^2 O(x, y) J_0[kz(x, y)(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)] \quad (2)$$

式中, k 为波数. J_0 为贝塞尔函数,自变量包含振动的振幅信息 $z(x, y)$.

由式(2)可知,振动状态下的再现物光场为被贝塞尔函数调制的物体振幅像.进一步可知,当自变量为零时,贝塞尔函数取最大值,待测物体静止,此处对应的条纹最亮,为第一级亮条纹,以此类推.此外,通过贝塞尔函数绝对值的根可知条纹的位置和级数,利用其变化规律,可进一步求出振幅,并且同一级条纹的振幅相等.

2 提高条纹对比度的方法

式(1)、(2)给出了振动前、后 P 点的再现物光场与相位变化的传统关系.在实际应用中,照明光、物光与 z 轴方向有一个夹角,振动前后 P 点反射的光到达记录面时在纵向上有一个微小的位移.这会使再现物光场产生一个相差,进而在利用条纹模式计算振幅值时出现系统误差.另外,由于物体表面粗糙,使得记录过程中产生散斑噪音,进而使再现物光场存在高频相位噪音,最终造成振动测量曲线的随机误差.因此,为了获得高对比度的条纹模式进而准确计算振幅分布,首先要去除由于散斑噪音引起的相位误差,其次去除由于散斑噪音引起的高频相位噪音,从而获得高对比度的条纹,提高振幅的测量准确度.

根据泰勒公式,照明光、物光与 z 轴方向有夹角

时,可认为带来的相位误差是式(2)基础上乘以附加相位因子 $\eta(x, y)$. 因此,用振动再现物光场除以静止的再现物光场,可得贝塞尔函数乘以附加相位因子 $\eta(x, y)$. 由于贝塞尔函数平方的相位恒为零,所以取这一项平方的相位,即为 $2\eta(x, y)$,将 $\eta(x, y)$ 代入原始振动的再现物光场中减去,即去除相位误差的影响^[15].

待测物体表面通常粗糙不平,导致记录过程中存在散斑噪音. 再现物光场被高频乘性相位噪音所覆盖,使得条纹模式的对比度大大下降.

首先,将物体静止时的再现物光场记为^[16]

$$U_i = R_0^2 O_0(x, y) \exp [i(\phi_{00} + \varphi_{\text{env}})] \quad (3)$$

式中, $O_0(x, y)$ 和 $(\phi_{00} + \varphi_{\text{env}})$ 分别为物光波在记录面的强度分布和相位分布. ϕ_{00} 是物体在平衡位置时物光与参考光的相位差,为高频随机相位噪音. 而 φ_{env} 是有限的、随机分布且缓慢变化的,由环境因素决定.

然后,物体振动时的再现物光场,即式(2)记为

$$U_i = R_0^2 O_0(x, y) \exp(i\phi_{00}) J_0[kz(x, y)(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)] \quad (4)$$

接着,分别取式(3)和(4)的实部和虚部

$$C_0 = R_0^2 O_0(x, y) \cos(\phi_{00} + \varphi_{\text{env}}) \quad (5)$$

$$S_0 = R_0^2 O_0(x, y) \sin(\phi_{00} + \varphi_{\text{env}}) \quad (6)$$

$$C_v = R_0^2 O_0(x, y) \sin(\phi_{00}) J_0(\phi_v) \quad (7)$$

$$S_v = R_0^2 O_0(x, y) \sin(\phi_{00}) J_0(\phi_v) \quad (8)$$

式中, $\phi_v = kz(x, y)(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$. 将四项共轭相乘并相加,得

$$C_N = C_0 C_v + S_v S_0 = R_0^4 O_0^2(x, y) \cos \varphi_{\text{env}} J_0(\phi_v) \quad (9)$$

$$S_N = S_0 C_v - S_v C_0 = R_0^4 O_0^2(x, y) \sin \varphi_{\text{env}} J_0(\phi_v) \quad (10)$$

最后,式(9)、(10)除以 $\sqrt{C_0^2 + S_0^2}$ 归一化,再根据欧拉公式合并,得到去除高频相位噪音后的再现物光场

$$U_{i1} = R_0^2 O_0(x, y) [\exp(i\varphi_{\text{env}})] J_0(\phi_v) \quad (11)$$

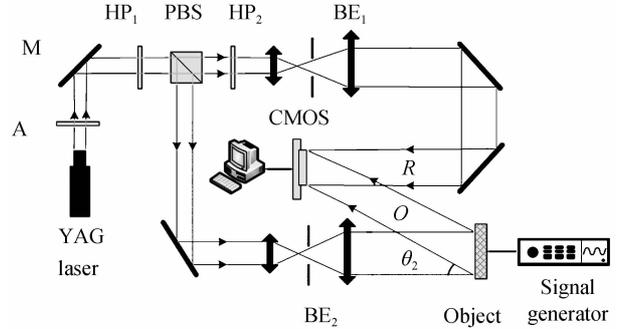
可以看出,根据贝塞尔函数相位的特点可有效去除相位误差的影响;利用静止状态下再现物光场能够消除高频相位噪音的影响,进而提高测量准确度.

3 实验验证

3.1 实验系统

图 2(a) 给出了时间平均数字全息光路示意. 以波长 532 nm、功率 150 mW 的固体激光器(YAG laser)作为系统光源,出射光束经衰减片(A)和半波片 1(HP₁)后进入偏振分光棱镜(PBS)分为两束. 其中一束通过空间准直扩束系统(BE₁)成平行光,作为参考光 R. 另一束经准直扩束(BE₂)成平行光,作为照明光,该光束经被测物体反射后携带物面信息成为物光 O. 参物光在 CMOS 相机(像素尺寸为 6.7 × 6.7 μm²)光敏面发生干涉并被记录,传送到计算机进行存储. 旋转半波片 1(HP₁)可以调整光束偏振态,实现对物参光分光比的调节;旋转半波片 2(HP₂)保证两束光的偏振方向一

致,使得干涉条纹对比度最大. 实验中, θ_1 约为 0°, θ_2 约为 12°. 信号发生器(Signal generator)产生的正弦信号通过多媒体有源音箱以声音,即声波的方式激励物体产生振动. 整个测量系统置于高准确度的光学实验平台上,有效隔离周围环境振动的影响.



(a) Optical structure for off-axis digital holographic interferometry system



(b) Reed

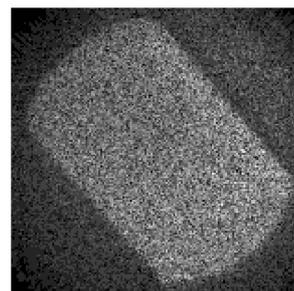
图 2 时间平均数字全息干涉光路系统

Fig. 2 Time-average digital holographic interferometry system

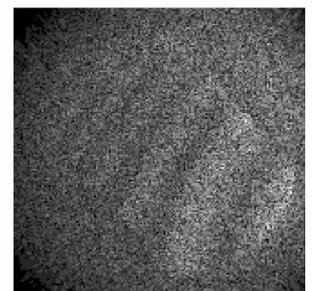
图 2(b) 中测量样品为由芦苇制成的簧片,表面粗糙,下端固定不动. 物体的待测表面积为 $3 \times 1.2 \text{ cm}^2$,全息记录距离为 100 cm. 测量频率范围是 0~10 000 Hz,记录时相机的曝光时间为 100 ms.

3.2 实验结果及分析

首先记录一幅簧片静止时的全息图,然后在不同振动频率激励下记录时间平均全息图. 如图 3, (a)~(d) 分别给出了以频率为 0、1 100、2 000 和 9 000 Hz 的正弦声波激励下,簧片的振幅再现像(图像尺寸为 321×321 像素). 可以看出,由于贝塞尔函数连续的最



(a) 0Hz



(b) 1100Hz

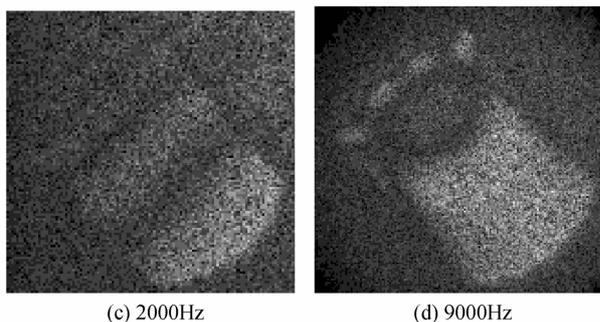


图3 时间平均全息再现像
Fig. 3 Reconstructed image based on time-average hologram

大值越来越小,条纹对比度逐渐降低,限制了振幅测量范围.另外,图像中存在大量的散斑噪音,难以直接计算振幅分布.

以振动频率为 2 000 Hz 簧片的再现像为例采用本文方法进行处理、分析.

图 4(a)为振动再现物光场的相位图.图 4(b)为贝塞尔函数乘以附加相位因子 $\eta(x, y)$ 的包裹相位分布图.图 4(c)为其平方的包裹相位分布图,可以看出,测振过程中由于物体的纵向位移产生了一个附加相位.图 4(d)为修正后再现物光场的相位,可以看出簧片的轮廓及相位分布.

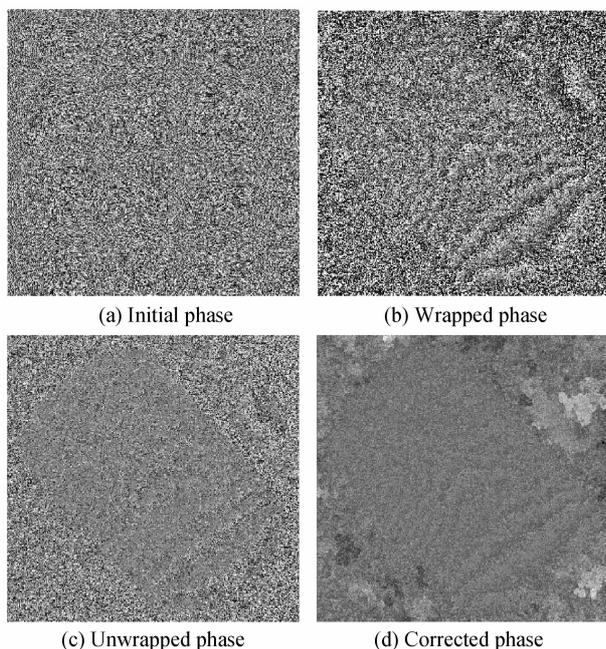


图4 相位校正的实验结果
Fig. 4 The experimental results of phase correction

将相位校正的结果运用到式(3)~(11),图 5(a)为原始的物体振动再现像,条纹模式模糊.图 5(b)为高频相位噪音抑制后的再现像,可以看出条纹模式对比度提高.

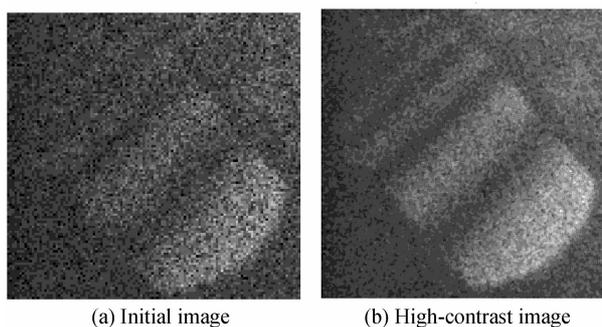


图5 处理前、后再现像的对比
Fig. 5 Reconstructed image of before and after treatments

用处理过后的振动再现物光场的幅度除以静止的幅度,得到贝塞尔函数的绝对值,即 $|J_0|$,其自变量包含振幅信息 $z(x, y)$,如图 6.图 6(a)为未处理的 $|J_0|$,图像模糊;图 6(b)为处理后的 $|J_0|$,簧片边缘和条纹分布及变化明显.簧片下端固定静止不动,取为贝塞尔函数的坐标原点.同一级条纹对应的振幅相等,取图 6 中垂直于条纹的一系列数据为代表,如图 7,该曲线满足 $|J_0|$ 的变化规律.其中,虚、实曲线分别是处理前、后的画线结果.曲线整体向上偏移,主要受散斑噪音影响,但仍可看出曲线的起伏变化,从而判断条纹的级数和亮暗,并且实线不仅更平滑,起伏变化与理论分析也更一致.

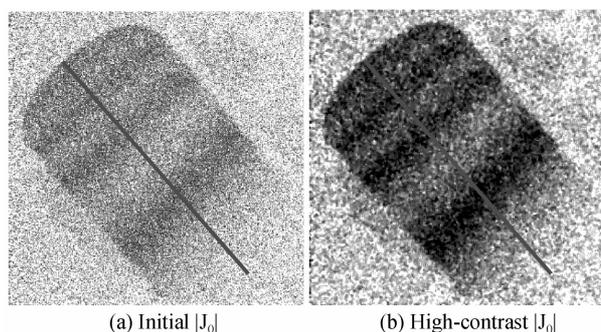


图6 处理前、后 $|J_0|$ 的对比
Fig. 6 Comparison of $|J_0|$ of before and after treatments

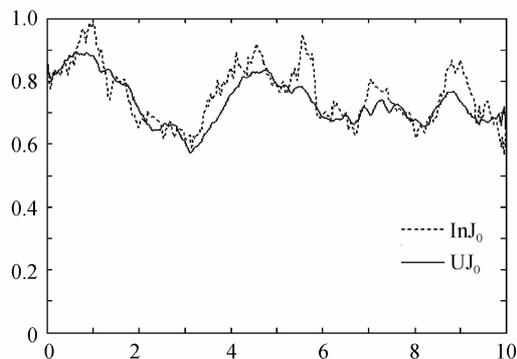


图7 处理前后 $|J_0|$ 曲线的对比
Fig. 7 Comparison of $|J_0|$ curve of before and after treatments

曲线最大值对应振幅零点,三级零点分别对应图7的三级波谷,即对应第一、二、三级暗条纹。 $|J_0|$ 与自变量 $kz(x,y)(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$ 为无量纲量。

将 $|J_0|$ 曲线反演并根据条纹的级数确定对应的横坐标值,即 $kz(x,y)(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$,与振幅值呈线性关系。由于 θ_1, θ_2 和光源波长已知,可计算获得曲线上任意一点对应的振幅值 $z(x,y)$,进而获得整个面的振幅分布。另一方面,由于贝塞尔函数的理论值已知,因而可算出对应任意一点的振幅理论值,并与实验值进行比较。以三级零点为例,计算得振幅如表1。测量误差主要受散斑噪声的影响,实验结果与理论计算趋势一致,证明该方法的有效性。

表1 基于幅度的零点及振幅

Table 1 Zeros and amplitude based on intensity

0 point of $ J_0 $	1		2		3	
	Zero point	Amp./ nm	Zero point	Amp./ nm	Zero point	Amp./ nm
Experimental value	2.556	109.4	5.704	244.2	8.326	356.4
Theoretical value	2.405	102.9	5.520	236.3	8.654	370.4
Error	6.31%		3.34%		3.78%	

4 结论

时间平均数字全息测振技术在实际应用中受物体纵向微小位移、表面粗糙度等因素影响,使得测量准确度降低。采用本文方法能够去除在振动过程中物体微小位移造成的相位误差及相干记录过程中引起的散斑噪声,有效提高了再现像及条纹模式质量,进而准确获得物体面振动幅度信息,提高了测振准确度。本文方法实现对面的微振动的定性分析和准确的定量测量,为工业环境中实现原位探测表面粗糙物体的微振动提供了可靠的途径。

参考文献

[1] YANG Chang, ZHOU Hong-pu, ZHANG Min, *et al.* A new fiber-optic flexible reed accelerometer [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(2): 209-214.
杨昌,周宏朴,张敏,等. 新型簧片式光纤加速度传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(2): 209-214.

[2] GONG Hua-ping, YANG Xiao, TU Yu-Meng, *et al.* Vibration detection characteristics of FBG sensor and resistance strain gauge[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 810-813.
龚华平,杨效,屠于梦,等. FBG传感器和电阻应变仪的振动监测特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(3): 810-813.

[3] TABATABAI H, OLIVER D E, ROHRBAUGH J W, *et al.* Novel applications of laser Doppler vibration measurements to medical imaging[J]. *Sensing and Imaging*, 2013, **14**(1-2): 13-28.

[4] CHIARIOTTI P, CASTELLINI P, MARTARELLI M. Recovery of mode shapes from continuous scanning laser Doppler vibration data: a mode matching frequency domain approach[M]. *Topics in Modal Analysis I*, Vol 7. Springer International Publishing, 2014: 207-213.

[5] YANG Zhi-qiang, WU Zhen-sen, ZHANG Geng, *et al.* The statistical properties of dynamic speckle produced by rotating rough target[J]. *Acta Photonica Sinica*, **43**(8): 0812003.
阳志强,吴振森,张耿,等. 旋转粗糙目标动态散斑统计特性研究[J]. *光子学报*, **43**(8): 0812003.

[6] SZKULMOWSKI M, GORCZYNSKA I, SZLAG D, *et al.* Efficient reduction of speckle noise in optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1337-1359.

[7] ZHU Fan, WU Yi-ming, LIU Chang-chun. Eliminating Influence of Grating Encoder's Eccentricity and Vibration to Moiré Fringes Signal by Four Reading Heads[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412008.

[8] POKORSKI K, PATORSKI K. Visualization of additive-type moiré and time-average fringe patterns using the continuous wavelet transform[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): 3640-3651.

[9] RAO Fan, QIAN Xiao-fan, PENG Zu-jie. Vibration measurement based on time-average digital holography and the shearing interferometry [C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011*. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81920L.

[10] PSOTA P, LEDL V, DOLECEK R, *et al.* Measurement of piezoelectric transformer vibrations by digital holography[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, **59**(9): 1962-1968.

[11] CONG Lin, XIAO Wen, RONG Lu, *et al.* Long distance real-time measurement of multi-points micro-vibration in region by digital holography[J]. *Optik*, 2014, **125**(10): 2369-2373.

[12] STETSON K A. Study of clarinet reeds using digital holography [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(11): 112305.

[13] MO Ping-hua. The numerical computation of 1th Bessel function generalized integration [J]. *Mathematical Theory and Applications*, 2007, **27**(1): 65-67.
莫平华. 一阶贝塞尔函数广义积分的数值计算[J]. *数学理论与应用*, 2007, **27**(1): 65-67.

[14] PATORSKI K, TRUSIAK M. Highly contrasted Bessel fringe minima visualization for time-averaged vibration profilometry using Hilbert transform two-frame processing [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(14): 16863-16881.

[15] QIAN Xiao-fan, WANG Zhan-liang, ZHANG Hai-tao, *et al.* Vibration amplitude distribution measurement using phase of reconstructed wave in time-average digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 523-528.
钱晓凡,王占亮,张海涛,等. 基于相位分析的时间平均数字全息测振研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 523-528.

[16] BORZA D N. Mechanical vibration measurement by high-resolution time-averaged digital holography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, **16**(9): 1853.

[17] BORZA D N. Full-field vibration amplitude recovery from high-resolution time-averaged speckle interferograms and digital holograms by regional inverting of the Bessel function [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(8): 747-770.