

文章编号 1004-924X(2012)08-1789-07

利用数字全息干涉术测量电路板的连续弯曲形变

杨德兴^{1*}, 许增奇¹, 姜宏振¹, 付永辉², 王 骏¹, 邵兆申², 赵建林¹

(1. 西北工业大学 理学院 陕西省光信息技术重点实验室
空间应用物理与化学教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;
2. 中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要:采用离轴菲涅耳数字全息干涉术实现了对电路板表面的连续弯曲形变测量。在电路板两端依次施加 0.01 mm 至 15 mm 位移载荷过程中, 记录了 1 501 幅全息图。通过相邻两幅全息图数值重建的复振幅相位分布相减得到干涉相位差, 根据相位差与离面位移的关系计算得到照明测量区域的离面位移, 通过累加获得了施加 1~15 mm 位移载荷时电路板表面的弯曲形变测量结果。由 5 块相同规格电路板上照明测量区域中同一电容中心点的离面位移, 计算得到测量结果的 A 类不确定度不超过 0.008 mm, 加载夹具引起的测量结果的 B 类不确定度为 0.003 5 mm, 测量结果的合成不确定度不超过 0.008 7 mm。实验表明这种利用离轴菲涅耳数字全息干涉术测量物体大位移连续弯曲形变的方法具有良好的重复性和稳定性。

关键词:数字全息干涉术; 离轴菲涅耳全息术; 电路板; 弯曲形变

中图分类号: O438.1; TN407 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1789

Measurement of continuous bending deformation for circuit boards by digital holographic interferometry

YANG De-xing^{1*}, XU Zeng-qi¹, JIANG Hong-zhen¹, FU Yong-hui²,
WANG Jun¹, SHAO Zhao-shen², ZHAO Jian-lin¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of the Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710100, China)
* Corresponding author, E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn

Abstract: The measurement of continuous bending deformation for a circuit board surface was achieved by using digital off-axis Fresnel holographic interferometry. 1 501 holograms were recorded by applying a displacement load to both ends of the circuit board from 0 to 15 mm by the step of 0.01 mm. The interference phase difference was obtained by subtracting the complex amplitude phase distributions of two adjacent holograms with numerical reconstruction. Then, the out-of-plane displacement of the lighting measurement area was obtained according to the relationship between the phase difference and

收稿日期: 2012-03-13; 修订日期: 2012-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61127011)

the out-of-plane displacement, and the measurement results were obtained by accumulating the bending deformation of the displacement load from 1 mm to 15 mm. By calculating the out-of-plane displacements of the same capacitor center in the lighting measurement area from five pieces of circuit boards with the same specifications, it indicates that the measurement results are no more than 0.008 mm for the type A uncertainty, no more than 0.003 5 mm for the type B uncertainty from a loading clamp and no more than 0.008 7 mm for the combined uncertainty. The results show that the method based on digital off-axis Fresnel holographic interferometry for measuring the continuous bending deformation of the object with a large displacement load has good repeatability and stability.

Key words: digital holographic interferometry; off-axis Fresnel holography; circuit board; bending deformation

1 引言

随着电路系统复杂化程度的不断提高,同一块电路板上通常会焊装各种不同的电子元器件和集成电路芯片,在电路板的安装、运输或其它一些高负荷应用条件下,电路板可能会发生较大弯曲形变,其上的器件也可能因电路板的弯曲形变而失效乃至损坏,导致电路系统无法正常工作,甚至带来灾难性的后果。揭示电路板在外部载荷作用下的变形过程和形变特征可用于研究电路板的力学响应特性,对优化电路板的选材和结构设计至关重要。

测量物体形变的方法很多,最传统的是使用位移计或粘贴应变片^[1]。这些方法测量精度较低,易受环境影响,且无法实现全场测量,需要凭经验布置测点。传统的光学测量方法^[2]如,全息法、散斑法、影像云纹法等,均通过干涉条纹分析得到物体变化前后的相位差,然后进一步求得位移等形变信息,但这些方法需要经过对记录介质进行曝光、显影等物理化学处理过程,再现过程复杂,周期较长。数字全息干涉技术^[3]能够很好地解决这一问题,其通过 CCD 等光电成像器件在物场的连续变化过程中记录多幅数字全息图,然后利用数值计算给出不同时刻物场的复振幅分布,将其进行比较来得到相应的干涉相位差。利用其与待测物理量之间的关系,可方便地实现对物场变化的实时测量。这种方法具有测量精度高、响应灵敏和实现全场测量等优点,因此在许多研究领域得到广泛应用,例如测定材料泊松比^[4],观察晶体畴反转的区域特性^[5],水流场的实时可视化测量^[6],研究渐变光纤的特性^[7]等。在利用数字

全息干涉术测量物体形变方面,国内外学者也进行了大量研究工作^[8-15],证明了该方法在形变测量方面具有精度高,易于实现全场测量等优点,但在对物体两端施加大位移载荷的过程中,利用数字全息干涉术测量物体表面的连续弯曲形变方面的研究还未见报道。

本文利用数字全息干涉术,在对电路板两端施加大位移载荷的过程中,采用离轴菲涅耳数字全息记录光路测量电路板表面的连续弯曲形变,实验证明这是一种有效测量物体连续弯曲形变的方法。

2 数字全息干涉的基本原理

假设数字菲涅耳全息图的记录波长和记录距离分别为 λ 和 d ,其复振幅透射率函数为 $i_H(k, l)$,其中 k, l 表示全息图平面上抽样点的数字坐标。用数字参考光波 $R_H(k, l)$ 照明全息图,则透射光场的复振幅分布为:

$$u_H(k, l) = R_H(k, l) i_H(k, l). \quad (1)$$

$u_H(k, l)$ 向前传播,满足菲涅耳衍射条件时,在与全息图平面相距为 d 的观察平面上可以得到所记录物光波场的复振幅分布^[16]:

$$u_a(m, n) = A \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(m^2 \Delta x^2 + n^2 \Delta y^2)\right] \times \text{DFT}\left\{u_H(k, l) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d}(k^2 \Delta x_H + l^2 \Delta y_H^2)\right]\right\}_{m, n}, \quad (2)$$

式中: A 为复常数, m, n 表示观察平面上抽样点的数字坐标, DFT 表示离散傅里叶变换, $\Delta x_H, \Delta y_H$ 和 $\Delta x, \Delta y$ 分别表示全息图平面和观察平面上的采样间距,二者有如下关系:

$$\Delta x = \frac{\lambda d}{M \Delta x_H}, \Delta y = \frac{\lambda d}{N \Delta y_H}, \quad (3)$$

式中: M 、 N 分别表示全息图在 x 、 y 方向上的像素总数。

由 CCD 记录物场不同状态下的两幅数字全息图 $i_{H1}(k, l)$ 和 $i_{H2}(k, l)$, 然后分别对全息图 $i_{H1}(k, l)$ 和 $i_{H2}(k, l)$ 进行数值再现, 得到相应的物场复振幅分布 $u_1(m, n)$ 和 $u_2(m, n)$, 从中提取出相位分布 $\phi_1(m, n)$ 、 $\phi_2(m, n)$, 进而可以得到两状态下物光波的包裹相位差分布:

$$\Delta\phi(m, n) = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2 & \phi_1 \geq \phi_2 \\ \phi_1 - \phi_2 + 2\pi & \phi_1 < \phi_2 \end{cases}. \quad (4)$$

包裹相位差 $\Delta\phi(m, n)$ 反映了物场各点的相对相位变化, 对其进行相位解包裹运算, 可获得反映物场变化的连续相位差分布。根据光程差的定义, 样品加载前后表面反射光波的相位差与离面位移量之间应满足如下关系:

$$\Delta d(m, n) = \frac{\lambda \Delta\phi(m, n)}{4\pi}. \quad (5)$$

因此, 利用式(5)即可获得样品加载前后的离面位移。

3 实验测量系统

实验测量系统主要由离轴菲涅耳全息图记录光路(如图 1 所示)、试样加载夹具(如图 2 所示)、CCD、图像数据采集与处理系统组成。

图 1 所示的光路中, Verdi 激光器发出的细激光束($\lambda = 532 \text{ nm}$)经半透半反镜 BS_1 后分成两束: 一束经过针孔扩束器 BE_1 后由透镜 L_1 准直, 经反射镜 M_1 反射后透过分束镜 BS_2 投射到 CCD 靶面上作为参考光波; 另一束由反射镜 M_2 反射后, 经过针孔扩束器 BE_2 后由透镜 L_2 准直, 垂直照射到待测电路板表面, 经其反射后透过 BS_2 投射在 CCD 靶面上作为物光波。物光波与参考光波干涉所形成的条纹由 CCD 靶面记录, 得到数字全息图。利用该光路系统分别记录电路板表面变形前后的两幅数字全息图, 然后由菲涅耳变换法对其进行数值重建, 得到样品表面变化前后的物光波场复振幅分布, 从中提取出相应的相位变化分布, 并由式(5)计算出样品表面的离面位移分布。全息图记录距离为 0.851 m , 实验所用 CCD 为黑白型 Basler-scA1600, 其靶面的实际尺

寸约为 $7.2 \text{ mm} \times 5.4 \text{ mm}$, 像素数为 $1\,626(H) \times 1\,236(V)$, 每个像素的尺寸为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$ 。

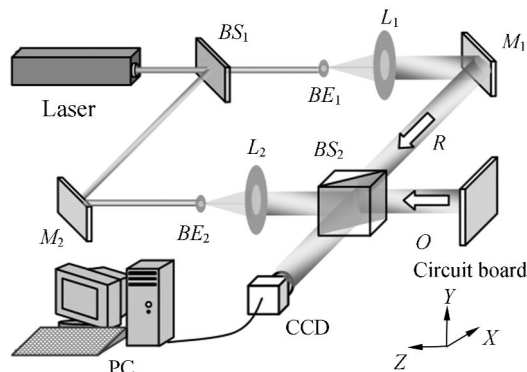


图 1 离轴菲涅耳全息图记录光路
Fig. 1 Recording setup of off-axis Fresnel hologram

图 2 为测量电路板连续弯曲变形的加载夹具结构示意图。它主要由 2 个前三角柱锥和 1 个后三角柱锥组成。在加载的过程中, 后三角柱锥不动, 2 个前三角柱锥通过旋转螺旋千斤顶给电路板两端对称施加相等的位移载荷。

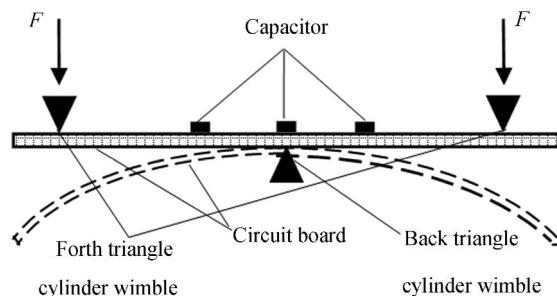


图 2 用于电路板离面位移测量的加载夹具结构示意图
Fig. 2 Loading clamp setup for circuit board displacement measurement

图 3(a) 为电路板的布局示意图, 图 3(b) 为照明测量区域的放大图, 电路板上焊有 24 个多层陶瓷电容器, 虚线 1 和虚线 2 为对称加载位置, 相距 100 mm , 电路板中间的虚线为零位移线。在固定电路板时, 后三角柱锥顶在电路板中间虚线位置处, 因为在加载的过程中, 后三角柱锥不动, 所以电路板中间虚线位置处的位移为 0。

测量时, 将电路板固定在加载装置上, 用图 2 所示的后三角柱锥顶在图 3(a) 零位移线处, 2 个前三角柱锥对称的顶在图 3(a) 中虚线 1 和 2 处, 给电路板两端施加一定的位移载荷, 使夹具的 3 个三角柱锥与电路板能够完全贴合, 将该状态下

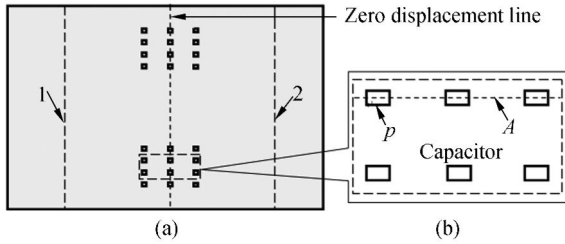


图 3 电路板布局示意图

Fig. 3 Layout diagram of circuit board

的电路板作为物场的初始状态,在加载的过程中,2个前三角柱锥通过旋转螺旋千分杆给电路板两端对称施加相等的位移载荷,螺旋千分杆每旋转一格(0.01 mm)记录一幅全息图,对电路板照明测量区域(图 3(b))连续记录 1 501 幅全息图,利用式(4)计算出 1 501 幅全息图中每相邻 2 幅全息图的干涉相位差,进而利用式(5)得到电路板两端每步进加载 0.01 mm 位移载荷时所对应的电路板照明测量区域的离面位移量,最后将这些步进离面位移量累加,从而得到电路板照明测量区域的总形变量。

4 实验结果

实验中待测电路板长 150 mm,宽 60 mm,厚 1.6 mm,照明测量区域的横向宽度为 29.2 mm,纵向宽度为 17.6 mm。2个前三角柱锥之间的距离为 100 mm。取全息图的再现距离等于全息图的记录距离。通过所述方法得到了电路板两端对称加载位移载荷时,电路板的离面位移测量结果,图 4(a)、(b)为某相邻两幅全息图,图 4(c)为再现出的相应连续相位差分布。图 5 为电路板两端对称加载 8 mm 位移载荷时,电路板的离面位移测量结果,图 4、5 中 X 轴为电路板的横向位置坐标,Y 轴为电路板的纵向位置坐标,Z 轴为电路板的离面位移。

选取 5 块相同规格的电路板样品,通过所述方法分别给 5 块电路板两端对称加载 1~15 mm 的位移载荷来测量图 3(b)中电容 p 中心点的离面位移,如图 7 所示,并计算了电路板两端加载相同位移载荷时,5 块电路板上电容 p 中心点离面位移的均值与标准偏差,以此来衡量测量结果的重复性和稳定性。

图 6 为电路板两端对称加载 1~15 mm 位移

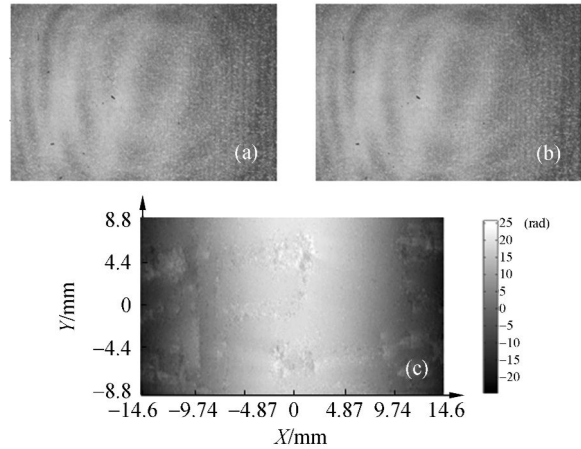


图 4 相邻两幅全息图和相应的连续相位差分布

Fig. 4 Two adjacent holograms and corresponding continuous phase difference distribution

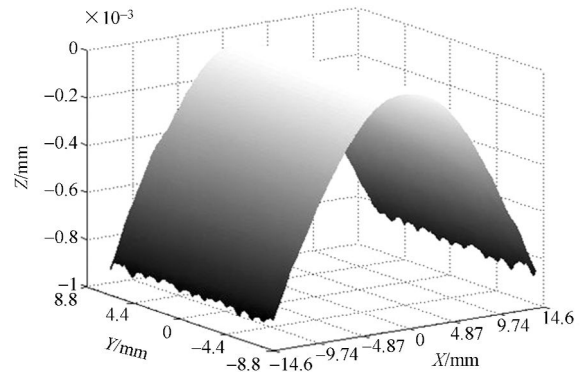


图 5 电路板离面位移测量结果

Fig. 5 Measurement result of out-of-plane displacement of the circuit board

载荷时,图 3(b)中虚线 A 所对应的离面位移测量结果。图中 1~15 号曲线分别为电路板两端加载 1~15 mm 位移载荷时,电路板照明测量区域虚线 A 处所对应的离面位移。可以看到,测量结果是以零位移线为对称轴的曲线,随着电路板两端加载位移载荷的增大,虚线 A 上同一位置处(如图 6 中虚线 1 所示)所对应的离面位移也在不断增大。

表 1 为电路板两端加载相同位移载荷(1、2、3、……15 mm)时,5 块电路板样品上电容 p 中心点离面位移的均值与标准偏差,由表 1 得到,电容 p 中心点离面位移的标准偏差不超过 0.018 mm,因此测量结果的 A 类不确定度不超过 0.008 mm。

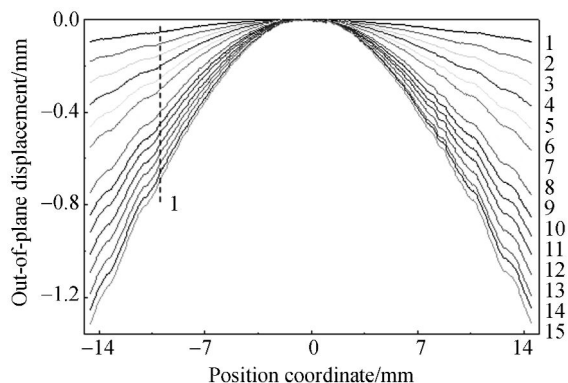


图 6 虚线 A 对应的离面位移

Fig. 6 Out-of-plane displacement of dashed line A

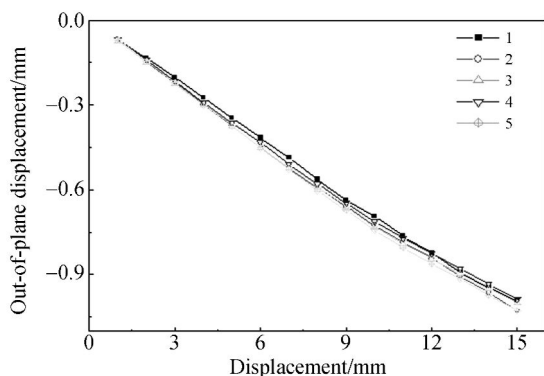


图 7 电容中心点的离面位移

Fig. 7 Out-of-plane displacement of capacitor center

表 1 电容 p 中心点离面位移的均值与标准差

Tab. 1 Mean values and standard deviations of capacitor p center (mm)

Displacement	Mean value	Standard deviations	Displacement	Mean value	Standard deviations
1.000	-0.070	0.002	9.000	-0.656	0.013
2.000	-0.143	0.006	10.000	-0.721	0.018
3.000	-0.217	0.009	11.000	-0.784	0.016
4.000	-0.293	0.011	12.000	-0.840	0.016
5.000	-0.366	0.013	13.000	-0.897	0.014
6.000	-0.440	0.016	14.000	-0.954	0.015
7.000	-0.514	0.017	15.000	-1.007	0.018
8.000	-0.586	0.016			

参考文献:

[1] 史洪宾,吴金昌,章晶. 印制电路板应变测量用应变片选用方法研究[J]. 印制电路信息, 2009(9): 30-35.

加载夹具在实验中的作用是非常重要的,其精度的高低直接影响实验结果的准确性和稳定性,其仪器误差决定了测量结果的 B 类不确定度。本文实验所用加载夹具的框架由数控机床整体加工而成,所用材质和结构尺寸考虑了加载时的刚度要求,且加载夹具具有定位销,以确保每次测量电路板时,可以实现对电路板两端的对称位移加载,传动轴采用了高精度线性导轨。加载夹具的仪器误差为 0.006 mm,该误差服从均匀分布,加载夹具引起的测量结果的 B 类不确定度为 0.003 5 mm,因此测量结果的合成不确定度不超过 0.008 7 mm,表明利用数字全息干涉术对电路板表面大位移连续弯曲形变情况进行测量的方法具有良好的重复性和稳定性。进一步可以采用程控步进电机驱动螺旋千分杆,并用程序控制进行全息图的采集,从而提高测量速度。

5 结 论

利用数字全息干涉术测量了电路板表面的连续弯曲形变,获得了电路板两端对称加载 1~15 mm 位移载荷时,照明测量区域的离面位移分布,从中获得了经过其中一排电容中心线所对应的离面位移。由 5 块相同规格电路板上照明测量区域中同一电容中心点的离面位移,计算得到测量结果的 A 类不确定度不超过 0.008 mm,加载夹具引起的 B 类不确定度为 0.003 5 mm,测量结果的合成不确定度不超过 0.008 7 mm,表明测量结果具有良好的重复性和稳定性。实验结果表明,该方法简单易行,尤其适合对样品进行实时全场测量,测量结果可靠,是一种有效的测量物体大位移连续弯曲形变的方法。

SHI H B, WU J CH, ZHANG J. Selection methodology study of strain gages for printed circuit board strain measurement [J]. *Printed Circuit Information*, 2009(9):30-35. (in Chinese)

[2] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 浙江:浙江大学出

- 版社,2002:165-166,235-242,302-305.
- YANG G G. *Modern Optical Testing Technology* [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2002: 165-166, 235-242, 302-305. (in Chinese)
- [3] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSING C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(5):291-293.
- [4] 徐莹,赵建林,范琦,等. 利用数字全息干涉术测定材料的泊松比[J]. *中国激光*, 2005, 32(6):787-790.
- XU Y, ZHAO J L, FAN Q, *et al.*. Determination of the poisson's ratio of material by digital holographic interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005,32(6):787-790. (in Chinese)
- [5] 曲伟娟,刘德安,职亚楠,等. 利用数字全息干涉术观察 $\text{RuO}_2 : \text{LiNbO}_3$ 晶体中畴反转的区域特性 [J]. *物理学报*, 2006,55(8):4276-4281.
- QU W J, LIU D A, ZHI Y N, *et al.*. Visualization of domain inversion region characteristics in $\text{RuO}_2 : \text{LiNbO}_3$ crystal by digital holographic interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8):4276-4281. (in Chinese)
- [6] SUN W W, ZHAO J L, DI J L, *et al.*. Real-time visualization of Karman vortex street in water flow field by using digital holography[J]. *Opt. Express*, 2009,17(22):20342-20348.
- [7] WAHBA H, KREIS T. Characterization of graded index optical fibers by digital holographic interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2009,48(8):1573-1582.
- [8] SEEBACHER S, OSTEN W, JUPTNER W. Measuring shape and Deformation of small objects using digital holography [C]. *SPIE*, 1998,3479:104-115.
- [9] YAMAGUCHI I, KATO J, MATSUZAKI H. Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2003,42:1267-1271.
- [10] 周文静,彭娇,于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. *光学精密工程*, 2005,13(增):47-51.
- ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp):47-51. (in Chinese)
- [11] QUAN C, TAY C J, CHEN W. Determination of displacement derivative in digital holographic interferometry [J]. *Opt. Commun.*, 2009,282(5):809-815.
- [12] 周灿林,元一澜. 数字全息干涉法用于形变测量 [J]. *光子学报*, 2004,3(2):171-173.
- ZHOU C L, KANG Y L. Deformation measurement by digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(2):171-173. (in Chinese)
- [13] TATAHASHI I, NOMURA T, MORIMOTO Y, *et al.*. Deformation measurement by digital holographic interferometry [J]. *SPIE*, 2003, 5264: 206-213.
- [14] MORIMOTO Y, NOMURA T, FUJIGAKI M, *et al.*. Deformation measurement by phase-shifting digital holography [J]. *Exp. Mech.*, 2005,45:65-70.
- [15] SOLIS S M, SANTTOYO F M, HERNANDEZ-MONTES M S. 3D displacements measurements of the tympanic membrane with digital holographic interferometry [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(5): 5613-5621.
- [16] SCHNARS U, JUPTNER W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. *Appl. Opt.*, 1994,33(2):179-181.

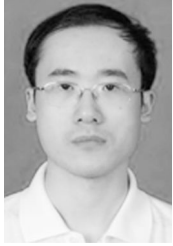
作者简介:



杨德兴(1966—),男,四川绵竹人,博士,教授,博士生导师,西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室副主任,主要从事光纤传感及光电系统、激光超声物理及应用、光波场调控及应用等方面的研究。E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn



许增奇(1986—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术以及数字全息方面的研究。E-mail: hao13891298443@163.com



姜宏振(1984—),男,山东淄博人,博士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail:jianghz2003@sina.com



邵兆申(1976—),男,山东菏泽人,高级工程师,主要从事电子设备抗力学环境设计、力学试验、电子元器件力学可靠性等方面的研究。E-mail:shao_email@163.com



付永辉(1982—),男,陕西渭南人,工程师,主要从事电子设备抗力学环境设计、力学试验、电子元器件力学可靠性等方面的研究。E-mail:395498245@163.com



赵建林(1958—),男,陕西西安人,博士,教授,博士生导师,西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室主任,主要从事光信息技术及应用(光电混合及数字光学信息处理,新型光电子器件及应用,光纤传感、微纳米光子学)方面的研究。E-mail:jlzhao@nwpu.edu.cn



王 骏(1979—),男,江苏东台人,博士研究生,主要从事光学系统设计、光学测试技术及应用等方面的研究。E-mail:wangjun790102@yahoo.com.cn

● 下期预告

光学自准直法对物体挠曲角的高精度测量

乔培玉^{1,2},何 昕¹,魏仲慧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了实现三维物体的挠曲角测量,建立了光学自准直法测量系统。利用该系统对转台的十字丝坐标进行提取,以实现挠曲角的测量。首先,对 CCD 拍摄到的十字丝图像采用 Sobel 提取算子进行边缘检测,然后,采用自适应阈值分割进行直线提取。由于转台上有其它的划痕存在,采用局部最小二乘进行十字丝的提取,最后,采用加权整体最小二乘法进行十字丝两条线的直线拟合,联立两方程,得出交点坐标值。结果表明,此方法获取的两直线斜率之积的精度在 $\pm 1\%$ 以内,非常接近十字丝斜率之积的真值(理论真值为 -1),使用徕卡经纬仪(精度为 $0.5''$)的角度值作为真值进行进行精度标定,测得精度 α 角为 $3.59''$, β 为 $3.76''$,完全满足系统挠曲角测量的精度要求。