

文章编号 1004-924X(2009)05-1099-06

# 用数字全息术检测轮胎气泡缺陷

朱 越, 刘文耀, 刘方超, 王晋疆

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**提出了一种基于二次曝光数字全息干涉术的子午线轮胎内部气泡缺陷无损检测方法。该方法利用数字全息记录系统记录下轮胎初始状态和受热膨胀变形状态的数字全息图,在计算机中对这些数字全息图分别再现后,将代表轮胎变形状态的再现波前与其初始状态的再现波前进行干涉,获得携带轮胎变化信息的干涉条纹和相位分布;分析了存在气泡缺陷区域的轮胎和无缺陷轮胎两种情况下的干涉条纹及其相位分布的特点和区别。分析结果表明:在轮胎内部存在缺陷的位置,其二次曝光数字全息干涉条纹具有与质量正常位置处干涉条纹相对独立的特征,该方法可以检测出轮胎气泡缺陷,记录系统的横向分辨率为  $16.4 \mu\text{m}$ 。

**关键词:**数字全息术;子午线轮胎;缺陷检测

**中图分类号:**O438. 1 **文献标识码:**A

## Inspection of air bubble defect in tires by digital holography

ZHU Yue, LIU Wen-yao, LIU Fang-chao, WANG Jin-jiang

*(Opto-electronic Information Science and Technology Laboratory of the Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*

**Abstract:** A double-exposure digital holographic interferometry is proposed to use in the inspection of the air bubble defect in radial tires. A series of digital holograms recording the initial state and deformation state of a radial tire are recorded in a computer, then the reconstructed images are obtained by the computer. In comparison with the interference fringes between the deformed wave-front and undeformed wave-front from the defective tires and the regular tires, the characteristics of the interference fringes and phase distribution from different tires are obtained and the detection rules are established. The results show that the double-exposure digital holographic interference fringes in the air bubble defect area have special features, which indicates the proposed method can be used in tire defect inspection in high precision, and the horizontal resolution of the system is  $16.4 \mu\text{m}$ .

**Key words:** digital holography; radial tire; defect inspection

## 1 引言

子午线轮胎具有的高速、节能、耐用、安全、舒适等优点,使得它在工业中得到广泛应用。但是在制造过程中,由于受生产设备及工艺流程等因素的影响,轮胎内部容易出现气泡缺陷<sup>[1]</sup>,严重影响产品质量和使用寿命,因此必须对每一条成品轮胎进行检验以确保人车安全。

光学全息和电子散斑是两种常用的检测轮胎气泡缺陷的光学干涉检测方法<sup>[2]</sup>。传统的光学全息方法具有高精度和高灵敏度的优点,但是需要化学湿处理和光学再现才能获得记录波前,处理速度缓慢,在实际生产检测中难以应用;电子散斑技术虽然记录速度快,但是后续图像处理过程比较复杂,并且这两种方法都存在无法直接获得被测物体相位信息的缺点。

数字全息技术是近十几年来快速发展的一种光学干涉计量技术<sup>[3-4]</sup>。数字全息技术利用 CCD 等电子记录介质记录全息图,通过在计算机中模拟衍射过程实现数字再现,克服了传统全息术需要化学湿处理和无法直接获得物体相位信息的缺点,因此被广泛地应用于显微观测、离子场分析、变形和振动测量、三维形貌测量和超快记录等领域<sup>[5-12]</sup>。

针对传统子午线轮胎气泡缺陷光学干涉检测技术存在的问题,本文提出一种利用二次曝光数字全息术检测轮胎气泡缺陷的方法。利用对轮胎适当加热的方法使之产生微量变形,编制程序控制 CCD 记录轮胎初始状态和受热膨胀变形后的数字全息图,对这些数字全息图分别进行再现,然后把代表轮胎胶皮初始状态和变形后状态的两个数字全息再现波前叠加,获得携带其变形特征的干涉条纹图,再分析质量合格轮胎和有气泡缺陷的轮胎其变形条纹及其相位的特征和区别,为轮胎气泡缺陷检测提供实验依据。

## 2 原理分析

数字全息记录和再现过程如图 1 所示,被记录的物体位于  $x_0y_0$  平面,记录全息图的 CCD 面

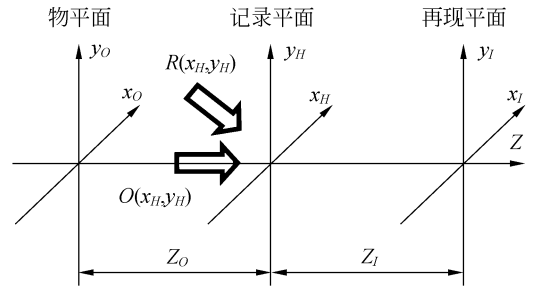


图 1 数字全息记录和再现示意图

Fig. 1 Recording and reconstruction of digital hologram

位于  $x_Hy_H$  平面,再现平面位于  $x_Iy_I$  平面。CCD 记录面与物平面的距离为  $Z_0$ ,再现距离即记录平面与再现平面的距离为  $Z_I$ 。假设在 CCD 记录面上的物光场分布为  $O(x_H, y_H)$ ,记录过程中参考光保持不变,其复振幅分布为  $R(x_H, y_H)$ ,那么此时记录的数字全息图可以表示为:

$$I(x_H, y_H) = |O(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)|^2 = |O(x_H, y_H)|^2 + |R(x_H, y_H)|^2 + O(x_H, y_H)R^*(x_H, y_H) + O^*(x_H, y_H)R(x_H, y_H), \quad (1)$$

其中 \* 表示的是复数的共轭。

数字全息图的再现是通过在计算机中模拟衍射过程实现的。当记录距离  $Z_0$  满足菲涅耳近似条件

$$Z_0^3 \gg \frac{1}{8\lambda} [(x_H - x_0)^2 + (y_H - y_0)^2]_{\max}^2, \quad (2)$$

被记录物体的再现像  $\phi(x_I, y_I)$  可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\phi(x_I, y_I) = \frac{1}{j\lambda Z_I} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} Z_I\right) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z_I} (x_I^2 + y_I^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x_H, y_H) C(x_H, y_H) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z_I} (x_H^2 + y_H^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda Z_I} (x_H x_I + y_H y_I)\right] dx_H dy_H, \quad (3)$$

其中  $C(x_H, y_H)$  为计算机模拟的再现参考光波。 $\Psi(x_I, y_I)$  为复数,其绝对值表示被记录物体的强度信息,其相位可以通过下式的相位展开获得,

$$\phi = \arctan \frac{\text{Im}[\phi(x_I, y_I)]}{\text{Re}[\phi(x_I, y_I)]}. \quad (4)$$

记录物体初始状态和物体膨胀变形后的数字全息图,对这两幅数字全息图分别再现,根据二次曝光的原理,将变形前后波前叠加形成干涉条纹,可以表示为:

$$I = |\psi_1(x_I, y_I) + \psi_0(x_I, y_I)|^2, \quad (5)$$

其相位可以通过下式计算<sup>[14]</sup>:

$$\Delta\phi = \arctan \left[ \frac{\operatorname{Re}(\psi_1)\operatorname{Im}(\psi_0) - \operatorname{Im}(\psi_1)\operatorname{Re}(\psi_0)}{\operatorname{Re}(\psi_1)\operatorname{Im}(\psi_0) + \operatorname{Im}(\psi_1)\operatorname{Re}(\psi_0)} \right], \quad (6)$$

其中  $\psi_1$  为物体变形后的物光波相位,  $\psi_0$  为物体没有变形时物光波的初始相位。

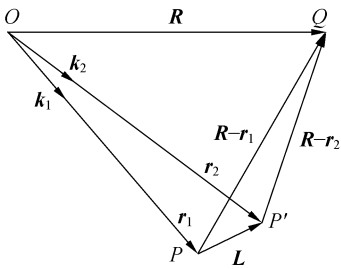


图2 位置和波矢示意图  
Fig. 2 Position and vector

式(5)和式(6)所表示的干涉条纹和相位包含了物体变化的信息,仅仅得到干涉条纹是不够的,还需要进一步分析其相位  $\Delta\phi$  与物体变形量之间的关系。物体变形的位置和波矢如图2所示<sup>[15]</sup>,  $O$  为点光源,  $P$  为物体上一点,  $Q$  点位于记录平面。物点  $P$  变形后到达位置  $P'$  处,位移矢量为  $L$ , 矢量  $r_1$ ,  $r_2$  和  $R$  位于点  $PQO$  确定的平面内。 $k_1$  和  $k_2$  分别是照明  $P$  点的光波和经  $P$  点散射后的物光波的波矢,那么物点  $P$  变形前光波和变形后光波的相位差  $\Delta\phi$  与物点  $P$  的位移  $L$  的关系可以表示为:

$$\Delta\phi = (k_2 - k_1) \cdot L. \quad (7)$$

从式(7)易知,物体变形前和变形后两个状态的数字全息再现波前干涉形成的条纹携带的相位与物体的变形量有关,对于被检测对象——轮胎胶皮有气泡缺陷的位置处,由于气泡的热膨胀系数与周围橡胶的膨胀系数不同,因此在热作用下,该位置处胶皮的变形量也与周围不同,导致在有气泡缺陷的位置,再现波前所形成的干涉条纹具有相对独立的特征。

### 3 实验结果

实验光路如图3所示,激光光源为 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm。CCD 为 UNIQ VISION 公司的 UP800 型,像素数为  $1024 \times 776$ ,像素大小为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。

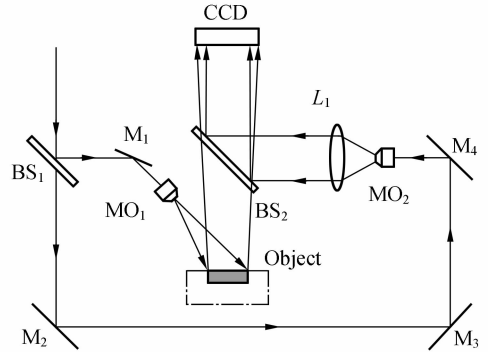


图3 实验光路图

Fig. 3 Experimental optical path

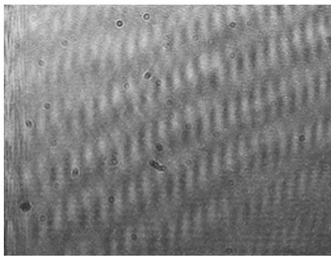
在实验中用分束镜  $BS_1$ ,  $BS_2$  和反射镜  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  构成数字全息记录光路。其中激光经过分束镜  $BS_1$  被分为两束,一束光被反射镜  $M_1$  反射再通过显微物镜  $MO_1$  扩束后照明物体,物体反射的光波透过分束镜  $BS_2$  到达 CCD 记录面形成物光波;另一束光波经过反射镜  $M_2$ ,  $M_3$  和  $M_4$  反射并扩束准直后,被分束镜  $BS_2$  反射到达 CCD 形成平面参考光波,两束光叠加形成干涉条纹。

被记录物体为两块来自同一轮胎,横截面呈梯形分布的圆形胶皮,这些胶皮的外形尺寸完全相同:直径为 15.00 mm,胶皮最薄处尺寸为 3.41 mm,最厚处为 5.33 mm,并且都位于轮胎的胎侧位置,胶皮的圆心与轮胎中心的距离相同,以此来保证它们基本特性的一致。一块内部存在一个直径为 8.00 mm,厚度为 1.00 mm 的气泡,另外一块胶皮内部没有气泡,以此来分析比较存在气泡和不存在气泡这两种情况下,由式(5)和(6)所表示的干涉条纹及其相位的特征。

在实验中胶皮被放置在恒温箱内,如图3中点画线所示,用加热的方法使之产生微量变形。胶皮与 CCD 之间的距离  $ZO$  为 150 mm,记录系统的横向分辨率为  $16.4 \mu\text{m}$ 。

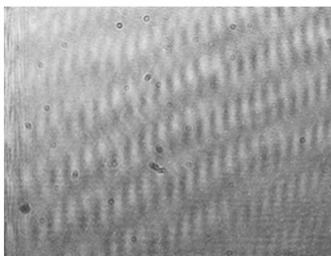
首先在常温下记录没有气泡胶皮的初始状态数字全息图,如图 4(a)所示;然后把恒温箱内温度提高到  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,稳定一段时间后,记录胶皮受热变形  $F_0$  所形成的数字全息图,如图 4(b)所示。图 4(c)是被记录物体两个状态下数字全息再现像干涉后形成的条纹分布,图 4(d)是由公式(4)计算得到的包裹相位,图 4(e)是其展开相位,图 4(f)是其第 150 行截面图。从图中可知,对于没有气泡的胶皮,因为整体的膨胀系数相同,所以由胶皮膨胀变形而产生的相位差呈线性变化,反映在干涉条纹中为直条纹分布,其相位为呈线性变化的斜面。

图 5(a)和(b)是用 CCD 记录的带有气泡缺陷胶皮变形前和变形后的数字全息图,记录条件与没有气泡胶皮的记录条件完全相同。图 5(c)是这两个再现像叠加后形成的干涉条纹,图 5(d)是其包裹相位,图 5(e)是展开相位,图 5(f)是其第 150 行截面图。从图中可知,此时形成的干涉条纹为圆形,其相位呈现球面分布。这是因为气体膨胀系数比固体的膨胀系数大,因此在有气泡的位置,胶皮表面膨胀的程度比周围橡胶的膨胀程度大,从而导致胶皮表面产生球面形状的突起,图 5(e)所示的展开相位很好地说明了这个特征。



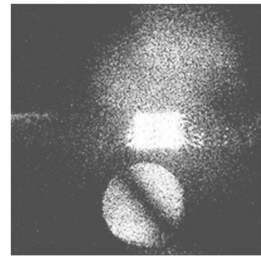
(a) 正常胶皮变形前数字全息图

(a) Digital hologram of undeformed tire without bubble defect



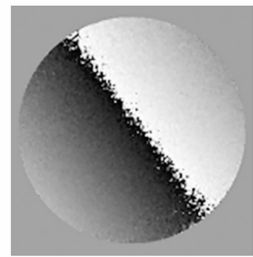
(b) 正常胶皮变形后数字全息图

(b) Digital hologram of deformed tire without bubble defect



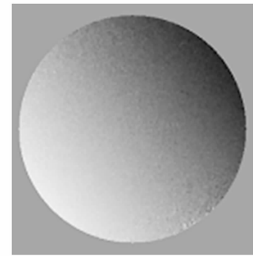
(c) 变形后再再现像干涉形成的条纹

(c) Interferogram of two reconstructed images



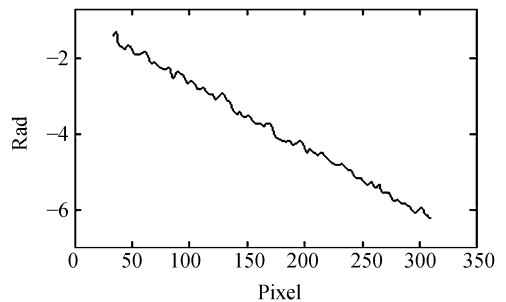
(d) 干涉条纹的包裹相位

(d) Wrapped phase of interferogram



(e) 展开相位

(e) Unwrapped phase of interferogram

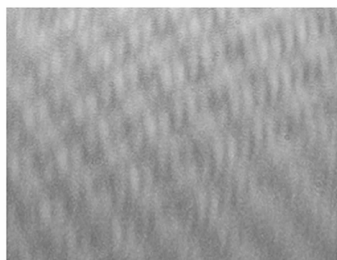


(f) 展开相位的第 150 行截面图

(f) Row No. 150 of Fig. 3(5)

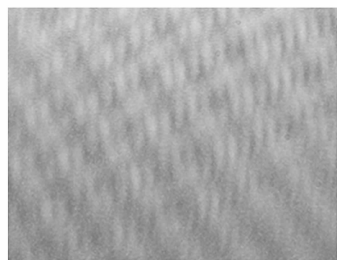
图 4 记录正常胶皮变形过程的数字全息图

Fig. 4 Digital holograms of tire deformation process without bubble defect



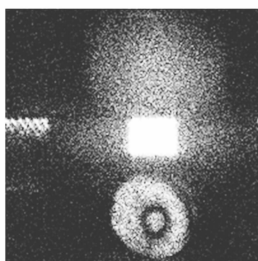
(a) 缺陷胶皮变形前数字全息图

(a) Digital hologram of undeformed tire with bubble defect



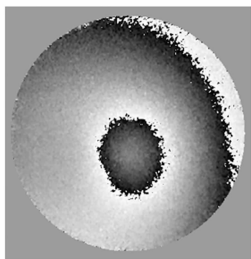
(b) 缺陷胶皮变形后数字全息图

(b) Digital hologram of deformed tire with bubble defect



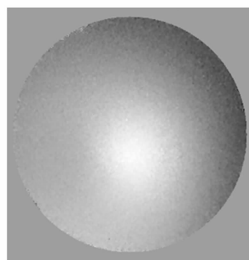
(c) 变形前后再现像干涉形成的条纹

(c) Interferogram of two reconstructed images



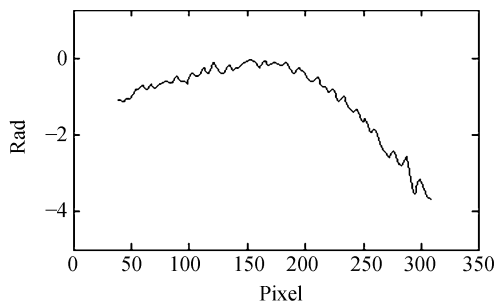
(d) 干涉条纹的包裹相位

(d) Wrapped phase of interferogram



(e) 展开相位

(e) Unwrapped phase of interferogram



(f) 展开相位的第 150 行截面图

(f) Row No. 150 of Fig. 3(5)

图 5 记录缺陷胶皮变形过程的数字全息图

Fig. 5 Digital holograms of tire deformation process with bubble defect

分析携带物体变形信息的干涉条纹及其相位特性,便能判断出轮胎内部中是否存在气泡缺陷。

## 4 结 论

本文设计了基于二次曝光数字全息术的子午线轮胎气泡缺陷检测系统,利用该系统记录了的质量合格和存在气泡缺陷两种轮胎变形前后的数字全息图,利用计算机模拟衍射获得数字全息再现波前,通过分析携带轮胎不同状态时的再现波前叠加所形成的干涉条纹及其相位特性,可知在轮胎内部存在缺陷的位置,其二次曝光数字全息干涉条纹具有与质量正常处于干涉条纹相对独立的特征。实验结果表明,本论文提出的方法能够为子午线轮胎的气泡质量检测提供可靠的实验依据,记录系统的横向分辨率为  $16.4 \mu\text{m}$ 。此外,在本文研究的基础上可进行气泡缺陷尺寸及其在轮胎中位置的定量分析和研究。

经过上述对比可知,在轮胎内部存在气泡缺陷的位置,其二次曝光数字全息干涉条纹具有与质量正常处于干涉条纹相对独立的特征,因此,通过

## 参考文献:

- [1] 王峰,吴桂忠.我国子午线轮胎技术概况[J].轮胎工业,2006,26(8):457-461.  
WANG F, WU G ZH. The survey of radial tire technology[J]. *Tire Industry*, 2006, 26(8): 457-461. (in Chinese)
- [2] 曾启林.用激光全息与电子散斑技术检测轮胎缺陷的对比研究[J].现代橡胶技术,2003,29(5):43-45.  
ZENG Q L. The contrast research between laser hologram and electronic speckle tire defect inspection technology[J]. *Advanced Rubber Technology*, 2003, 29(5): 43-45. (in Chinese)
- [3] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formulation from electronically detected hologram [J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [4] 潘武,田贻丽.光学全息的数字实现[J].光学精密工程,2005,13(增):15-20.  
PAN W, TIAN Y L. Digital implementation scheme of optical holograms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 15-20. (in Chinese)
- [5] SUCERQUIA G, XU W B, JERICHO S K, *et al.*. Digital in-line holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 836-850.
- [6] 于瀛洁,倪萍,周文静.基于全息图放大的数字全息显微结构测量[J].光学精密工程,2008,16(5):827-831.  
YU Y J, NI P, ZHOU W J. Micro-structure measurement of phase object by digital microholography based on magnified hologram[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 827-831. (in Chinese)
- [7] MADAMS T K, JUPTNER W. Particle measurement with digital holography [J]. *SPIE.*, 1999, 3823:38-43.
- [8] PEDRINI G, ALEXEENKO I, OSTEN W, *et al.*. On-line surveillance of a dynamic process by a moving system based on pulsed digital holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 2006, 45: 935.
- [9] PEDRINI G, OSTEN W, GUSEV M E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement[J]. *Applied Optics*, 2006, 20 (45): 3456-3464.
- [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):46-51.  
ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 46-51. (in Chinese)
- [11] JAVIDI B, TAJAHUERCE E. Three-dimensional object recognition by use of digital holography[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(9): 610-612.
- [12] LIU Z W, CENTURION M, PANOTOPOULOS G, *et al.*. Holographic recording of fast events on a CCD camera[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(1): 22-24.
- [13] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York:Mcgraw-Hill, 1996.
- [14] STETSON K A. Theory and applications of electronic holography[C]. *Proceedings of the International Conference on Hologram Interferometry and Speckle Metrology*, 1990:294-300.
- [15] WEST C M. *Holographic Interferometry* [M]. John Wiley & Son, 1979.

## 作者简介:



朱越(1976—),男,陕西汉中,人,博士研究生,主要从事数字全息无损检测技术、X射线无损检测技术、数字图像处理 and 模式识别等方面的研究。E-mail: tju.yzhu@yahoo.com.cn

刘方超(1985—),男,山东高密人,硕士研究生,主要从事X射线无损检测技术和数字图像处理等方面的研究。E-mail: tjuliufangchao@yahoo.com.cn

## 导师简介:

刘文耀(1944—),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要从事光电图像信息处理等方面的研究。E-mail: wyl@tju.edu.cn

王晋疆(1974—),男,河南林县人,工学博士,副教授,主要从事光电信息处理、精密测试技术和光学仪器等方面的研究。E-mail: wjj@tju.edu.cn