

文章编号: 1001-3806(2006)04-0412-03

## 空间载波相移法用于全息 CT 测量气体温度场

陈希慧, 焦春妍, 李俊昌\*

(昆明理工大学 理学院, 昆明 650093)

**摘要:** 为了能从干涉图像中快速识别相位, 将空间载波相移法用于实时全息检测, 以电热丝周围的气体为研究对象, 采用单次曝光法作了实时全息实验, 获得两种干涉图像, 结合全息 CT 技术, 均得到了待测气体的温度场。研究结果经比较表明, 该方法在实时全息干涉测量中, 不但可行, 而且准确度高, 便于实际应用。

**关键词:** 全息; 相位测量; 全息干涉术; 空间载波相移法; CT 技术; 温度场

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

### Spatial carrier phase-shifting method to the holographic CT measurement of gas temperature field

CHEN Xihui, JIAO Chunyan, LI Junchang

(School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** Spatial carrier phase-shifting method is used to real time holography detection for identifying phase quickly from interferogram. A real time holographic experiment is done on the gas around a heating cord by single exposure method and two types of interferogram are obtained. By using holographic CT technique, the temperature fields are both calculated. The comparison results show that the method is feasible and easy to practical application in real time holographic interferometry. Its accuracy is high.

**Key words** holography; phase measurement; holographic interferometry; spatial carrier phase-shifting method; CT technique; temperature field

## 引 言

在无损检测领域中, 全息干涉测量是一项重要技术<sup>[1-5]</sup>。随着高性能 CCD 的出现及计算机技术的高速发展, 用 CCD 记录干涉图并由计算机处理已成为科学研究和工程检测的有力手段。实际测量中, CCD 把携带被测物理量信息的光波以干涉图的形式记录下来, 而被测物理量往往隐含在光波相位中, 故如何从干涉图中解调出物光波相位是问题的关键。常用的相位测量方法有时间相移法、空间相移法、空间载波相移法和傅里叶变换法等<sup>[2]</sup>。它们有不同的特点, 获取相位信息时所需干涉图的数量也不相同, 因此, 根据实际测量做合理选择, 才能获得满意的结果。

全息干涉计量中, 单次曝光法是一种能进行实时全息检测的方法, 因被测物理量随时间变化, 若只用一幅干涉图就可获取物光相位信息, 便更容易进行实时

测量。目前流行的方法有两种: 傅里叶变换法<sup>[3]</sup>与空间载波相移法<sup>[4]</sup>。但将后者用于实时全息检测的报道较少, 因此对其进行研究, 以期了解该方法在实时全息检测中的特点, 为相关研究提供参考。

## 1 实验方法及基本原理

波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光通过分束镜分为两束光。沿水平方向的反射光经平面镜反射、扩束及准直后投向全息干版形成参考光; 沿垂直方向的透射光经另一平面镜反射、扩束及准直后形成物光, 如图 1 所示。以电热丝在施加不同电压时所产

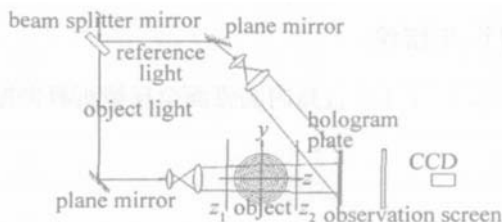


Fig 1 Experiment diagram of light path and temperature field distribution. The diagram shows the experimental setup for real-time holographic CT measurement. A He-Ne laser beam is split into reference and object beams. The reference beam is reflected by a mirror and focused onto a hologram plate. The object beam is reflected by another mirror, passes through a lens and an object (heating wire), and is focused onto an observation screen. A CCD camera captures the hologram. The coordinate system (y, z) is centered on the object.

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目 (20042F0025M)  
作者简介: 陈希慧 (1976), 女, 硕士研究生, 从事数字光信息方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jcl@vip.163.com

收稿日期: 2005-07-06 收到修改稿日期: 2005-09-06

再进行不同电压条件下电热丝加热温度场的实时全息记录,用 CCD 摄取半透明观测屏上的实时全息干涉图,并通过轻微旋转参考光形成空间载波干涉图,完成同等条件下的全息实时检测。

令被测物体“形变”前后到达观测屏的物光分别为:

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)] \quad (1)$$

$$O'(x, y) = O_0(x, y) \exp[i\{\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi_0(x, y)\}] \quad (2)$$

制作全息图时的参考光为:

$$R(x, y) = r_0(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)] \quad (3)$$

当单次曝光全息图制作完毕并复位后,若参考光相对于原参考光沿  $x$  方向转动了一微小角度  $\Delta\theta_x$ , 则其变为:

$$R'(x, y) = r_0(x, y) \exp[i\{\varphi_r(x, y) + i\frac{2\pi}{\lambda}x \sin\Delta\theta_x\}] \quad (4)$$

实时全息测量时观测屏上的干涉图强度分布为<sup>[6]</sup>:

$$I_1(x, y) = A(x, y) +$$

$$B(x, y) \cos[\Delta\varphi_0(x, y) - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{T_x}x] \quad (5)$$

式中,  $T_x = \lambda/\sin\Delta\theta_x$ ;  $A(x, y)$  和  $B(x, y)$  是与全息干版特性、物光振幅及参考光振幅相关的函数。图 2 中给出轻微旋转参考光后,对电热丝施加电压为 0V, 10V, 20V 时实际测量到的 3 幅空间载波干涉图(图 2 图 3 中坐标原点均在图像中心,  $x$  轴方向从上向下,  $y$  轴方向从左向右, 图像尺寸为 80mm × 80mm, 像素数为 400 × 400)。

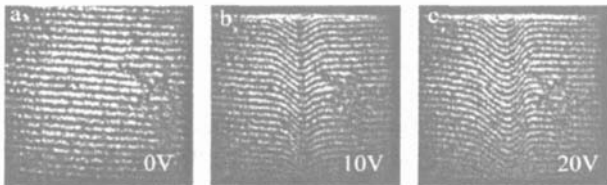


Fig 2 Spatial carrier interferogram of the heating cord in the heating process



Fig 3 a—the processed pattern of Fig 2c b—the denodulation interferogram of Fig 3a c—the interferogram with the hologram precise reposition

用空间载波相移法得到<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\varphi_0(x, y) = \frac{2\pi}{T_x}x + \frac{\pi}{2} +$$

$$\arctan \frac{[I_1(x - \Delta x, y) - I_1(x + \Delta x, y)] \tan(\frac{\pi}{T_x} \Delta x)}{I_1(x - \Delta x, y) + I_1(x + \Delta x, y) - 2I_1(x, y)} \quad (6)$$

式中,  $\Delta x$  是 CCD 测量图像的像素宽度。

由于  $T_x$  可由未变形物光对应的干涉图准确测出

(见图 2a), 故 (6) 式的计算只与物体变形过程中给定时刻的一幅干涉图强度有关。在实际测量中, 只要记录下不同时刻的干涉图, 便能获取与物体形变相关的相位变化, 进行不同时刻物体形变的计算。

## 2 空间载波相移法析出相位的验证

不难看出, 图 2 中的背景噪声对干涉图有显著影响, 利用图像处理中的局域平均法及条纹修复技术, 以图 2c 为例进行处理的结果见图 3a。为证实能从图 3a 中析出变形物光相位变化, 将变形物光及原始物光的理想干涉图表为:

$$I(x, y) = 127.5 + 127.5 \cos[\Delta\varphi_0(x, y)] \quad (7)$$

根据图 3a 提供的图像灰度及 (6) 式, 用 (7) 式绘出 0~255 灰度级的变形物光及原始物光的干涉图示于图 3b。为验证析出相位的可靠程度, 在图 3c 中同时给出了电热丝施加相同电压时, 全息图精确复位且参考光未作微小转动前获得的干涉图。图 3b 与图 3c 比较表明, 用空间载波相移法可足够准确地获得对比度好及调频噪声少的干涉图。在稍后的温度场定量研究中将看到, 从这两幅图出发获得的温度场基本相同(由于全息干涉测量对电热丝周围空气加热情况非常敏感, 即使施加相同电压也不可能完全重复同一状态, 故两幅干涉图在形式上有一些区别)。因此, 在所述实验条件下 (6) 式能足够准确地表述变形物光的相位变化, 当根据实际测量情况进行相位解包后, 就能为定量测量提供依据。

## 3 被测区域气体温度场的计算

为简单起见, 将被测温度场视为以  $x$  轴对称的轴对称场, 且忽略变形物光波面从  $z_2$  平面传播到观测屏的变化, 令  $\Delta L(x, y)$  为给定  $x$  值后从  $z_1$  到  $z_2$  平面传播时变形物光与原始物光的程差, 其理想干涉图的强度分布则为<sup>[7]</sup>:

$$I(x, y) = 127.5 + 127.5 \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[\Delta L(x, y) - \frac{\lambda}{2}]\right\} \quad (8)$$

与 (7) 式比较可得:

$$\Delta L(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi_0(x, y) + (n + \frac{1}{2})\lambda \quad (9)$$

式中,  $n = 0, 1, 2, \dots$  为相位解包时需确定的干涉条纹级次。

根据物理问题的先验知识, 远离电热丝的空气折射率基本不变化, 图像左右两侧对应程差最小区域, 而中央对应程差最大区域。因此, 令测量图像两侧  $n = 0$  并根据 (6) 式从两侧向中央逐一增加  $n$  来完成相位解包。

为证实空间载波相移法的可行性, 对图 3b 图 3c 标记的剖面同时进行测量, 图 4a 图 4b 中分别给出获

得的程差曲线。

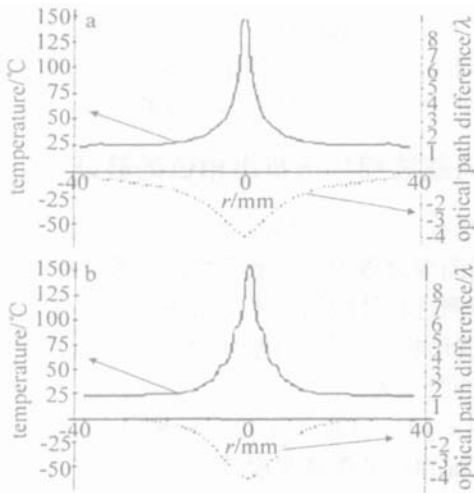


Fig 4 The result comparison of spatial carrier phase shifting method (Fig 4a) and gray-scale interferogram measuring method (Fig 4b)

将折射率场视为轴对称场,用环带法<sup>[5,7]</sup>作 CT 重建获得电热丝周围气体折射率的变化,它与温度分布有确定的数学关系,可由 G-D 公式及理想气体状态方程得<sup>[5,8]</sup>:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} = \frac{\Delta n \cdot R}{K \cdot M \cdot p} \quad (10)$$

式中,  $K$  为 G-D 常数,  $M$  为气体的摩尔质量,  $p$  为气体压强,  $R$  为气体的普适常数,  $T$ ,  $T_0$  分别为场温度和环境温度。  $T_0 = 24^\circ\text{C}$ , 图 4 中也给出了相应的温度分布。可以看出,两种测量方法获得的电热丝周围气体的温度分布基本一致。

## 4 讨论

对上述实验及数据的处理作如下讨论。

(1) 空间载波相移法成立的基本条件是  $\Delta x$  足够小,使得在  $\Delta x$  变化范围内  $\Delta\varphi_0(x, y)$  的变化相对于  $2\pi\Delta x/T_x$  可以忽略,即:

$$\Delta\varphi_0(x + \Delta x, y) - \Delta\varphi_0(x, y) \ll \frac{2\pi}{T_x} \Delta x \quad (11)$$

例如 CCD 能分辨的最短载波周期为  $T_x = 2\Delta x$ , 在使用 (6) 式时, 满足  $\Delta\varphi_0(x + \Delta x, y) - \Delta\varphi_0(x, y) \ll \pi$  的区域内或相邻像素位相变化远小于  $\pi$  时, 解调位相值才是较准确的。故选择合适的  $\Delta\theta_x$ , 产生能由 CCD 分辨并尽可能小的  $T_x$  是提高精度的关键。考查图 3h 图像中垂线附近灰度变化较剧烈, 但变化周期不到 3 次, 约  $6\pi$  的位相变化对应于 50 像素, 相邻像素位相变化远小于  $\pi$ , 故测量结果可靠。

(2) 作者选择沿物光方向的干涉图研究。理论及实验表明<sup>[9]</sup>, 适当选择光束比并沿参考光方向记录干涉图可获得高质量的测量结果。全息测量记录的优化工作与本文中提出的数字图像处理方法相结合, 将能有效地获得变形物光的相位变化。

(3) 衍射计算较繁杂, 通常忽略从  $z_2$  平面到干涉

图之间的衍射问题, 对实现准确测量, 这种处理不够严格。根据衍射逆运算理论, 可将  $z_2$  平面到观测屏的空气折射率视为均匀, 获取物光在观测屏的复振幅后, 通过衍射的逆运算计算  $z_2$  平面上物光的复振幅<sup>[10]</sup>, 可获得较好的测量结果。

(4) 实验研究表明, 全息片精确复位后参考光轻微转动角  $\Delta\theta_x$  获得的干涉图, 与参考光保持不变而全息图相对精确复位有  $-\Delta\theta_x$  角偏差的干涉图无本质区别, 故可用非精确复位时获得的干涉图进行测量。这等效于降低了单次曝光法测量时对全息图复位精度的要求, 一定程度上简化了实现测量的系统调试工作。

(5) 本文中的讨论是基于人为设计的轴对称介质折射率变化的基础上进行的, 但该研究有实际意义。因许多物理量的测量问题经抽象及简化后, 可由此方法进行测量, 例如模拟火箭推进器燃烧场或烛光场等也可视为轴对称场。

## 5 结论

根据实验所记录的两种图像, 分别对变形物光的相位进行了测量, 并利用轴对称场的 CT 重建技术<sup>[5]</sup>, 获得了不同时刻待测气体折射率变化的分布及气体温度场的三维分布。通过两种方法的比较, 表明了在实际全息干涉测量中空间载波相移法不但可行, 而且准确度较高, 非常便于实际应用。

## 参 考 文 献

- [1] FENG T Zh Application of holography in study of axisymmetric flow field [J]. Journal of Ballistics 1998, 10(1): 54~58 (in Chinese).
- [2] QIAN K M, XU B Q, WU X P. Phase measurement methods in optical interferometry [J]. Journal of Experimental Mechanics 2001, 16(3): 239~245 (in Chinese).
- [3] ZHANG L, LIU S N, LIN D Y *et al* The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 90~93 (in Chinese).
- [4] QIAN K M, WU X P. An improvement of spatial carrier phase shifting method [J]. Chinese Journal of Laser 2001, B10(2): 102~106
- [5] HE A Zh, YAN D P. Laser transient interferometry [M]. Beijing China Machine Press 1993 301~339 (in Chinese).
- [6] LI J Ch, XIONG B H. Phase identification and digital simulation study of a real time hologram [J]. Proc SPIE, 2002 5005 331~337.
- [7] LI J Ch, XIONG B H. Application of image simulation to the holographic CT measurement for refractive index of the gas in an incandescence lamp [J]. Chinese Journal of Lasers 2005 32(2): 252~256 (in Chinese).
- [8] YAO W, HE A Zh Three-dimensional flow field tomography based on phase unwrapping [J]. Acta Optica Sinica 1998, 18(11): 1562~1566 (in Chinese).
- [9] LI J Ch, XIONG B H. A fast phase identification method for real time holographic interferometry [J]. Proc SPIE, 2004 5290 250~256
- [10] LI J Ch, XIONG B H, ZHONG L Y *et al* Inverse calculation of diffraction and its application to the real time holographic interferometry [J]. Proc SPIE, 2000, 4659 284~290