

# 实时数字全息测量温度场研究

周战荣

(第二炮兵工程学院物理教研室,陕西 西安 710025)

**摘要:**利用数字全息干涉术研究了气流温度场的分布,对实验中所采集的干涉条纹图像进行傅里叶变换,数字低通滤波和傅里叶逆变换处理以消除散斑噪声影响,确保了气流场干涉条纹相位信息的高对比度和低噪声,并对其提取和展开;根据理论研究的相位与折射率的关系求得气流场的温度分布,实验结果与热电测量的结果基本一致,表明了实时数字全息干涉术是一种测量温度场的有效方法,具有极好发展和应用前景。

**关键词:**数字全息;干涉计量;温度场;傅里叶变换

**中图分类号:**TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.019

## Measuring temperature field with real-time digital holographic interferometry

ZHOU Zhan-rong

(Department of Physics, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Digital holographic interferometry is used to measure the temperature distribution of airflow field. A fast Fourier transform followed by a digital low-pass filter and an inverse Fourier transform are applied to interference fringes for removing speckle noise, so that airflow field phase information is in high-contrast and low noise. Phase is unwrapped to calculate phase difference. The temperature distribution is obtained by the relation between phase and refractive index. The results are consistent with the values measured by thermocouple. It is shown that the digital holographic interferometry is an effective method for measuring temperature field and the measuring precision can be greatly improved.

**Key words:** digital holographic; interferometry; temperature field; Fourier transform

### 1 引言

数字全息术是一种光学全息、计算机处理和电子图像记录相结合的新型成像技术,具有数字化处理、位相场的定量分析和实时性的显著优点,已成为光信息处理领域的一个研究热点。尤其随着高性能电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)的出现以及计算机技术的高速发展,使数字全息干涉计量术显示出更强大的生命力。实时数字全息干涉计量具有全场、无干扰、非接触、测量精度高和三维可视化测量等优点,国内外一些学者在该领域做了很多工作,并取得了较大进展,其应用范围已经扩展到粒子场测试、形貌测量、振动测量、材料物理性质检测、

生物体检测等方面<sup>[1-5]</sup>。但在实际测量中,被测量物理量的信息以干涉条纹的形式记录下来,如何从干涉条纹图像中提取被测物理量的数据是制约数字全息发展和应用的一个瓶颈。

本文将数字全息技术应用于气流场的温度测量中,重点研究从温度场干涉条纹图像中提取对应的温度分布数据。在实际温度场测量中,许多对象经过抽象、简化后,可等效为二维轴对称分布,如内燃机场、燃烧场、飞行器流场等<sup>[6-7]</sup>。因此,研究二维

**作者简介:**周战荣(1976-),男,硕士,讲师,研究方向为光学信息处理及干涉测量技术。E-mail: zzz\_ong@163.com

**收稿日期:**2011-03-21

轴对称温度场的测量具有实际指导意义。

## 2 测量原理

数字全息干涉术继承了普通光学全息术的基本思想,其最大特点是以 CCD 取代全息干板作为记录介质,记录到的全息图经数字化处理后存储于计算机中,然后以数字傅里叶变换取代光学衍射来实现所记录物场再现。通过对所记录的全息图强度分布作快速傅里叶变换,获得其空间频谱分布,从中分离并提取出物光波复振幅分布。如果令一束相干平面光波穿过某一存在温度起伏的介质空间,由于温度的起伏导致介质折射率的变化,透射光波将携带着介质受照射区域温度分布的信息。当对以此为物光波在温度场随时间变化过程中的不同时刻记录的全息图分别进行数字处理后,便可以再现出相应时刻穿过温度场的光波的复振幅分布<sup>[8]</sup>。

设再现的温度场变化前记录平面上的物光波复振幅分布为:

$$O(x, y) = O_o(x, y) \exp[j\phi_0(x, y)] \quad (1)$$

其中,  $O_o(x, y)$  和  $\phi_0(x, y)$  分别为物光波在记录平面上的振幅和相位分布。温度场变化时,介质的折射率分布发生改变,从而使物光波的相位分布由  $\phi_0(x, y)$  变为  $\phi'_0(x, y)$ ,但振幅一般不改变。因此可将所再现出的温度场变化后的物光波复振幅分布表示为:

$$O'(x, y) = O_o(x, y) \exp[j\phi'_0(x, y)] \quad (2)$$

将温度场变化前后等曝光量记录的两幅全息图作数字相加,然后再进行数字傅里叶变换及滤波处理,便可同时再现出温度场变化前后的两个物光波复振幅  $O(x, y)$  和  $O'(x, y)$ ,其叠加光强分布表达式为:

$$I(x, y) = |O(x, y) + O'(x, y)|^2 \\ = 4O_o^2(x, y) \cos^2 \left[ \frac{\phi'_0(x, y) - \phi_0(x, y)}{2} \right] \quad (3)$$

此式表明,如果两个温度场存在差异,则再现的光强分布图像中就会出现干涉条纹。

对干涉条纹进行傅里叶变换,设计合适的数字低通滤波器提取 +1 级频谱,在对其作逆傅里叶变换及相位展开处理后,即得到真实反映变形波面的形状。有了经流场后变形的波面形状,就可以获得确定位置上的测量物光波的相位改变值  $\Delta\phi(r)$ :

$$\Delta\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L [n(r) - n_0] dr \quad (4)$$

式中,  $L$  为测试段长度;  $n_0$  是待测原始折射率分布;  $n(r)$  是相位变化后的待测温度场的折射率分布。

通过对式(4)进行数学反演,便可确定被测温度场内的折射率分布  $n(r)$ 。对于均匀透明介质场,根据经典电动力学的知识可以得到折射率是介质密度的函数,即 G-D 公式<sup>[9]</sup>:

$$\frac{n-1}{\rho} = K \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为介质密度;  $K$  为格拉德斯通-戴尔常数,简称 G-D 常数,  $K$  随气体种类不同而不同。

研究气体流场温度分布时,其中的压力通常被认为是常数,并且其密度和温度近似满足理想气体的状态方程:

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (6)$$

式中,  $P$  为气体压强;  $T$  为温度;  $M$  为气体分子量;  $R$  为气体常数。

在气体流场温度分布的测试中,由于干涉条纹可求得气体受扰动前后折射率的改变量为  $\Delta n(r)$ ,又从式(6)和式(7)导出气体折射率和温度的关系:

$$n(r) - 1 = \frac{MPK}{RT} \quad (7)$$

由此便可得到温度与折射率改变量的关系:

$$T(r) = \frac{MPK}{R[\Delta n(r) + n_0 - 1]} \quad (8)$$

式(8)揭示了气体折射率场与温度场的关系,是数字全息干涉术测量温度的理论根据。

## 3 实验装置及结果

实验光路如示意图 1 布置,氦氖激光器发出的激光束,经扩束、准直后,由分束镜 BS1 分为两束,其中一束光垂直穿过待测温度场  $L$  后,经全反射镜 M1 和分束镜 BS2 后作为物光投射到 CCD 光敏面上;另一束光经全反射镜 M2 和分束镜 BS2 作为参考光投射到 CCD 光敏面上;参考光和物光由分束镜 BS2 调节到一定夹角照射到 CCD 光敏面上形成干涉图样。CCD 分辨率为  $795 \times 596$  阵列,像素大小为  $0.010 \text{ mm} \times 0.0108 \text{ mm}$ 。

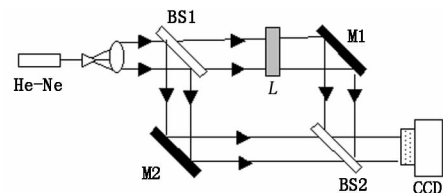


图1 数字全息干涉实验装置

Fig.1 experimental setup for digital holographic interferometry

待测温度场  $L$  是由通有电流的受电阻丝形成的空气温度场,实验时尽量保持周围环境稳定,因此温度场具有轴对称性。布置好各种装置后给电阻丝

通一恒定电流,采集一序列干涉图样,如图 2 所示,这一组干涉图样便反映物体周围温度随时间的变化,温度相同的地方折射率相同,光程也相同,每一干涉条纹就是一个等温线。干涉条纹图样分布仅仅取决于物体温度变化后的物光波的相位分布。利用式(7)和式(8)可以直接得到各点的相位及其相位差,从而可以精确地计算出物场中每一像素所对应得空间位置处温度的变化。

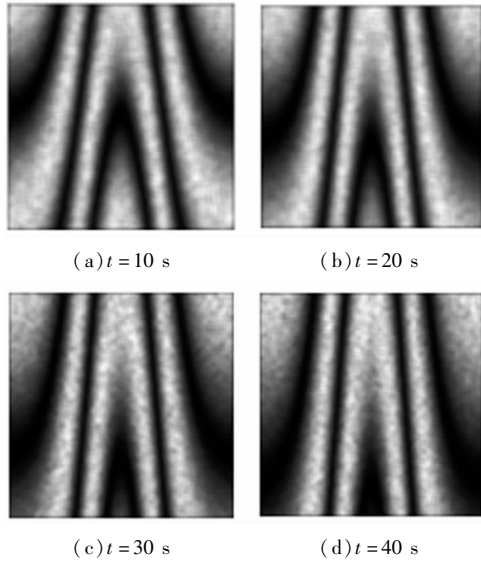


图 2 数字全息干涉实验结果

Fig. 2 experimental results of digital holographic interferometry

#### 4 干涉条纹图像的数据提取及验证

对实验采集不同时刻的干涉条纹图像傅里叶变换,设计合适的数字低通滤波器提取 +1 级频谱,然后对其进行逆傅里叶变换得到包裹相位图,如图 3 所示。对包裹相位按作者在文献[10]中的方法进行相位展开,结果如图 4 所示。

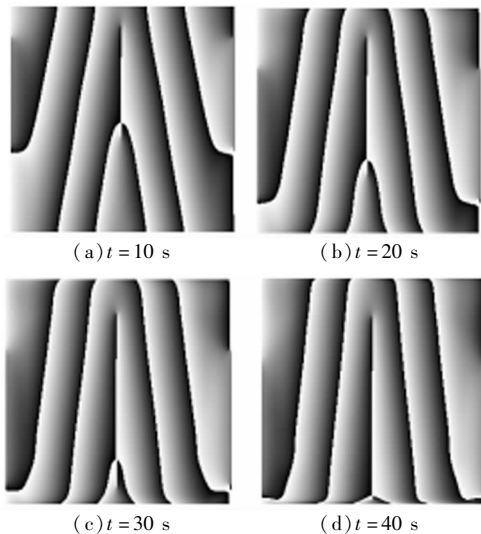


图 3 包裹相位分布

Fig. 3 wrapped phase distribution

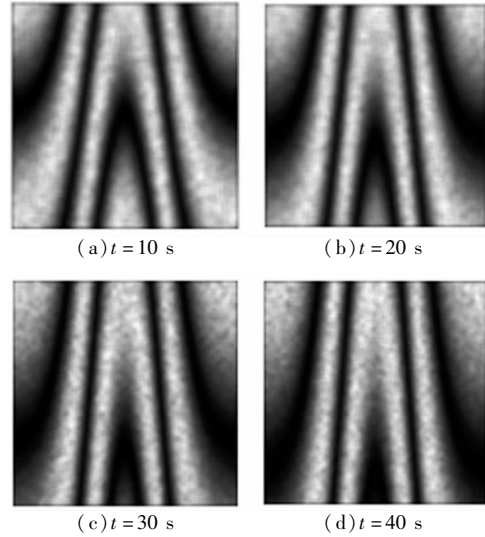


图 4 展开相位分布

Fig. 4 unwrapping phase distribution

设激光波长为  $\lambda = 632 \text{ nm}$ , 环境温度为  $18.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 由式(8)得到温度分布如图 5 所示,由于在相位提取过程中进行了频域滤波,对于散斑噪声及其他高频噪声自然进行了去噪处理,所以该方法具有天然的抗噪声能力。

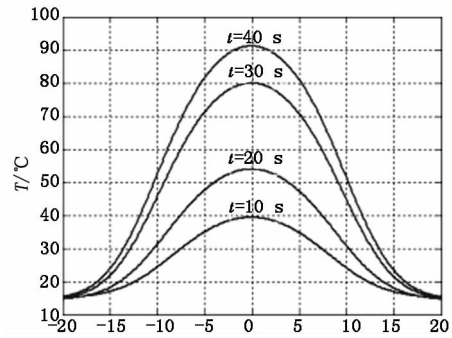


图 5 温度分布

Fig. 5 temperature distribution

为了验证实时数字全息测量结果的正确性,我们在干涉条纹图像采集完成后,保持整个实验装置不动,待环境回到初始态,在距电阻丝中心  $10 \text{ mm}$  处固定热电偶,给电阻丝通同样大小的电流,分别在  $10 \text{ s}$ ,  $20 \text{ s}$ ,  $30 \text{ s}$ ,  $40 \text{ s}$  时,由热电偶测得温度分别为  $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $29.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $40.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $52.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 与本文所提方法测得的温度基本一致,说明数字全息测量温度场是一种有效方法。

#### 5 结论

本文将数字全息干涉术引入到气流温度场的测量,理论分析了物光场的相位、气流场折射率和气流场温度的关系,采用傅里叶变换法从干涉条纹图像提取物光场的相位分布,定量地得到了气流场的温度分布,全息测量结果与实际温度基本相符,该方法

为测量温度场提供了一种有效的手段。该方法不仅使不可见的温度场以干涉条纹图像的形式显现于计算机上,具有实时可观测性,而且测量精度高,无干扰,有较好的发展和应用前景。

#### 参考文献:

- [1] L Miccio, D Alfieri, S Grilli, et al. Direct full compensation of the aberrations in quantitative phase microscopy of thin objects by a single digital hologram[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(4): 041104.
- [2] P Ferraro, G Coppola, D Alfieri, et al. Controlling images parameters in the reconstruction process of digital holograms[J]. IEEE, J. Selected Topics in Quant. Electron., 2004, 10(4): 829 - 839.
- [3] L Xu, X Y Peng, J M Miao, et al. Studies of digital microscopic holography with application to microstructure testing[J]. Appl. Opt., 2001, 40(28): 5046 - 5051.
- [4] S Nakadate, M Isshiki. Real-time vibration measurement by a spatial phase-shifting technique with tilted holographic interferogram [J]. Appl. Opt., 1997, 36(1): 281 - 284.
- [5] Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi, et al. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 57 - 61. (in Chinese)  
邸江磊, 赵建林, 范琦, 等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 57 - 61.
- [6] Lin Qizhao. Investigation on measuring the field of temperature and concentration in a diesel spray by laser double exposure holographic interferometry method [J]. Applied Laser, 1998, 18(4): 171 - 174. (in Chinese)  
林其钊. 激光双曝光全息干涉技术在测取喷束温度与浓度分布过程中的应用[J]. 应用激光, 1998, 18(4): 171 - 174.
- [7] Zhang Peng, Zhou Yingbiao, Zheng Chuguang. Reconstructing ax-symmetric temperature field by real-time holographic interference measuring method [J]. Power Engineering, 2003, 23(2): 2321 - 2324. (in Chinese)  
张鹏, 周应彪, 郑楚光. 实时全息干涉法重建轴对称温度场[J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2321 - 2324.
- [8] Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(12): 1447 - 1451. (in Chinese)  
赵建林, 谭海燕. 电子学全息干涉术用于温度场测量[J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1447 - 1451.
- [9] C M Vist. Holographic interferometry [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984: 118 - 124. (in Chinese)  
C M 维斯特. 全息干涉度量学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984: 118 - 124.
- [10] Zhou Zhanrong, Wang Hongxia, Ma Jin. An improved phase unwrapping algorithm [J]. Information Electronic and Computer Science, 2010, 11: 423 - 426.