

# 数字全息技术在温度场测量中的应用

贾晋超 莫卫东 李照祥 徐瑞阳 朱浩然 贾俊 廉晨

(空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051)

**摘要** 温度的微小变化必然会引起空气折射率的微小变化,进而影响通过该区域光的相位。采用迈克耳孙干涉仪与数字全息技术相结合的技术方案,实现对温度场分布的测量。借助数字视频技术,该技术架构可直接推广用于测量透明介质的流场分布及变化过程,如气流或水流中的密度分布以及变化过程等。

**关键词** 数字全息;温度场;流体场;光学测量

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030903

## Measurement of Temperature Field Based on Digital Holography Technology

Jia Jinchao Mo Weidong Li Zhaoxiang Xu Ruiyang Zhu Haoran  
Jia Jun Lian Chen

(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

**Abstract** The tiny change of temperature changes the refractive index of air, and then leads to the phase change of light propagating through the area where the refractive index has changed. We measure the change of temperature field by using Michelson interferometer and digital holography method. Our technique combined with digital photography can be used to measure hydrofield distribution and changing process, for instance, the density distribution and changing process in airflow and water stream.

**Key words** digital holography; temperature field; hydrofield; optical measurement

**OCIS codes** 090.1995; 120.6780

## 1 引言

数字全息技术是光学全息、计算机与光电探测技术相结合的数字化精密检测技术。数字全息的记录光路和普通光学全息基本相同,不同的是用 CCD 代替全息照相干板记录全息图,然后用计算机模拟参考光数值再现物光波前,并将结果显示在计算机屏幕上,因而实现了全息图的记录、存储、处理和再现的数字化<sup>[1]</sup>。借助于高性能计算机技术和数字图像处理技术,数字全息技术可以方便、灵活地对所记录的全息图进行存储和再现,实现无损、快速、准确的成像和传输。数字全息术同时具备了光学全息和数字技术的优点,包括全视场、非接触、三维成像和数字处理的灵活性、方便性等。近年来,数字全息技术在显微成像<sup>[2,3]</sup>、形貌测量<sup>[4,5]</sup>、微小位移/形变测量<sup>[6,7]</sup>、无损检测<sup>[8,9]</sup>等方面得到了广泛的应用和迅速的发展。本文以迈克耳孙干涉仪为基础,利用数字全息技术实现了对温度场分布的实时测量。

空气的温度发生变化会导致其密度变化,进而改变其折射率。对于穿过有温度变化的空气的物光来说,其光程和在接收屏上的相位就会发生变化,从而改变了干涉条纹。干涉条纹的变化必然带有了温度变化的信息,且干涉条纹变化的分布反映了被测空间的温度分布,干涉条纹变化的梯度说明了温度分布改变的大小,条纹变化后干涉图则是一系列等温线<sup>[10]</sup>。本研究采用 CCD 记录全息干涉图像,利用数字全息的理论与方法,从干涉条纹图像中解算出被测区域的温度分布以及温度变化的过程。

**收稿日期**: 2011-07-31; **收到修改稿日期**: 2011-08-25; **网络出版日期**: 2012-01-12

**基金项目**: 陕西省自然科学基金(2010JM8012)资助课题。

**作者简介**: 贾晋超(1983—),男,硕士,讲师,主要从事数字全息技术方面的研究。E-mail: jijicai123@163.com

## 2 实验光路

采用数字全息方法测量温度分布的光路有许多种,最常用的是马赫-曾德尔(M-Z)干涉系统。不过,本研究采用的是经典的迈克耳孙干涉架构,如图1所示。

激光器发出的激光束经过扩束系统后得到平行光,这束平行光在分束镜上分成两束。其中一束经分束镜反射到一个全反镜上反射回来,直接穿过分束镜到达 CCD,作为参考光;另一束在透射过分束镜后经过待测量的温度场,被全反镜反射回来,再次经过待测温度场,经过分束镜反射后与参考光在 CCD 接收面上干涉叠加,干涉图被 CCD 接收并数字化后保存在计算机上。随后通过对此干涉条纹图像进行数字全息数值分析,便可在计算机上显示出被测区域的温度分布情况。若 CCD 记录的是干涉图的一段视频,可将该视频的每一幅干涉图像进行数字全息数值分析,最终可得到被测温度场的温度分布变化的过程。

由于本研究所测量的温度分布变化相对不大且变化过程缓慢,采用迈克耳孙干涉仪使物光两次通过被测区域(图2),从而可将由于温度变化(空气折射率的改变)导致的光程差的改变量加倍,以提高测量的灵敏度。但是,若被测区域的温度变化很快时,采用 M-Z 干涉系统会更好。

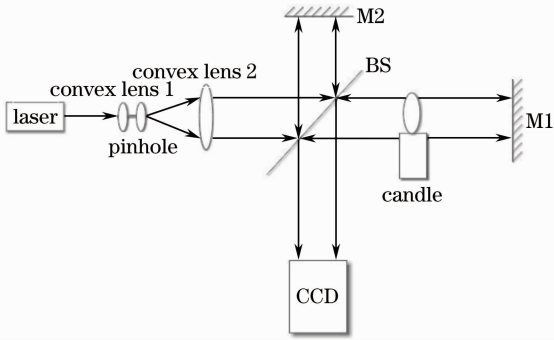


图1 实验光路图

Fig.1 Illustration of the optical system

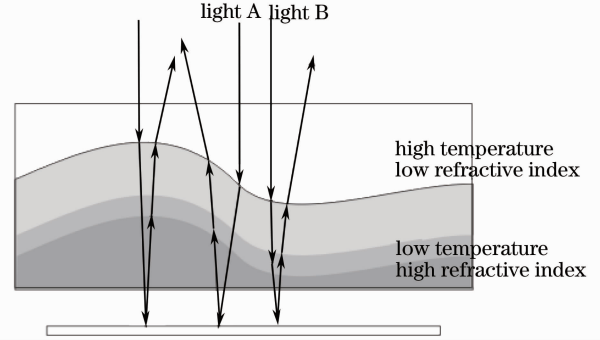


图2 光线两次经过待测场的光路示意图

Fig.2 Illustration of the light ray passing through the measured field twice

## 3 实验步骤与数字全息分析过程

### 3.1 数字全息法测量温度场的原理

数字全息技术能够准确计算出相干光场中各个位置处光路中的相位差,进而可以得到折射率的变化。然后利用 Gladstone-Dale 定律和理想气体状态方程就可以计算出空间中任一点的温度。

Gladstone-Dale 定律即

$$n - 1 = Cp, \quad (1)$$

理想气体状态方程为

$$pV = n'RT, \quad (2)$$

式中  $n$  为空气折射率,  $C$  为 Gladstone-Dale 常数,  $p$  为气体压强,  $V$  为气体体积,  $n'$  为气体物质的量,  $R$  为普适气体常数,  $T$  为气体温度。设室温为  $T_0$ , 对应的折射率为  $n_0$ , 由(1), (2)两式联立得

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} = \frac{R}{pC\mu}(n_0 - n), \quad (3)$$

式中  $\mu$  为空气摩尔质量。再结合折射率和相位之间的关系式  $\frac{2\pi}{\phi} = \frac{\lambda}{nl}$  以及所采用的迈克耳孙干涉仪的特点, 得到温度与相位之间的关系为

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} = \frac{R\lambda}{4\pi lpC\mu}(\phi_0 - \phi), \quad (4)$$

式中  $\phi_0$  为没有点燃蜡烛时光线的相位,  $\phi$  为点燃蜡烛后光线的相位,  $\lambda$  为所用激光的波长,  $l$  为物光方向上蜡烛火焰的宽度。只要拍摄的光场范围足够大, 其中能够包含温度不受火焰影响的部分, 就可以利用(4)式计算光场中某点的温度。

### 3.2 实验过程及分析

为了简化实验过程,充分研究数字全息用于温度场分布测量的基本技术和方法,本研究选择对最简单的情况,即对蜡烛光周围温度场分布进行测量。实验的步骤与分析过程如下。

1) 在蜡烛点火之前,先用 CCD 记录一张干涉图  $I_0$ (图 3)。在干涉图  $I_0$  中包含两部分信息:第一部分是

没有蜡烛影响时空气中的折射率梯度,第二部分是光路自身引入的系统误差。

2) 光路保持不变,点燃蜡烛。将蜡烛火焰的上半部分放置在光路中,再次记录一张干涉图  $I_1$ (图 4)或一段视频。在干涉图  $I_1$  中同样包含两部分信息:第一部分是受到蜡烛火焰影响后空气中的折射率分布,第二部分是系统误差。

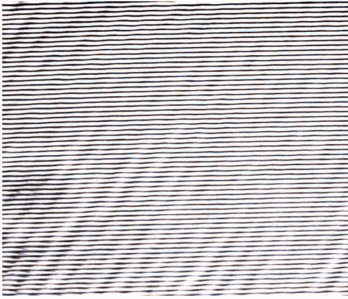


图 3 未点燃蜡烛时拍摄的干涉图  $I_0$

Fig. 3 Interferogram obtained before the candle is lighted up

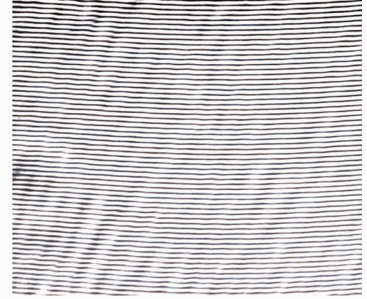


图 4 点燃蜡烛后拍摄的干涉图  $I_1$

Fig. 4 Interferogram obtained after the candle is lighted up

3) 对得到的两幅干涉图进行数字处理后得到将相位压缩在  $(-\pi, \pi)$  区间内的包裹相位图,对其解包裹之后就得到不同空间位置处光线的相位变化图,如图 5 所示,其中图,横、纵轴分别表示数字矩阵的行列数。

从图 5 可以看出,对于没有点火的温度场,最大相位与最小相位之差约为 4 rad,对应的光程差为多半个波长,空气的折射率变化很小,因此得到的图像变化很平缓。

4) 将得到的未解包裹的矩阵相减,就得到了点火前后光场中相位相对变化的结果。图 6 为未解包裹的温度场分布;图 7 为解包裹后的结果。

图 6、图 7 所反映的被测空气区域的相位变化  $\Delta\phi$  代表了点燃蜡烛前后该区域温度变化的情况。从图 6 可以看到,在蜡烛火焰尖端部分,等温线的形状与火焰的形状相似。从图 7 可以看到,图像下部靠近中间的位置数值比较大,表示点火前后,该位置相位的相对变化较大。根据(4)式,该处的温度是比较高的。同理,图像

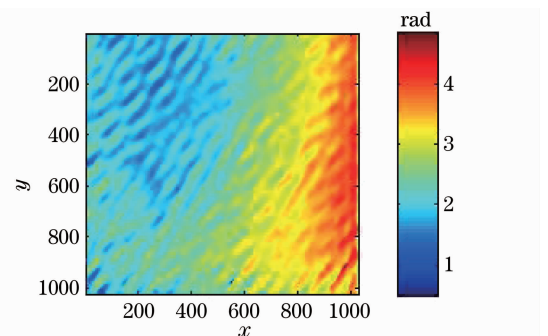


图 5 干涉图  $I_0$  的一级频谱相位图

Fig. 5 Phase distribution of the first frequency spectrum of  $I_0$

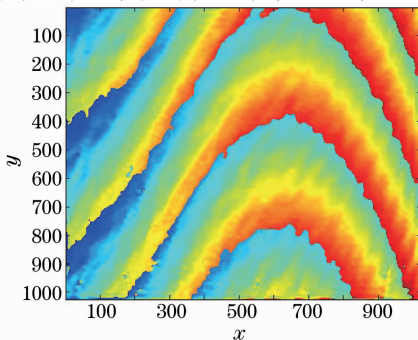


图 6 被测区域温度场分布变化图(未解包裹)

Fig. 6 Distribution of temperature field (without unwrapping)

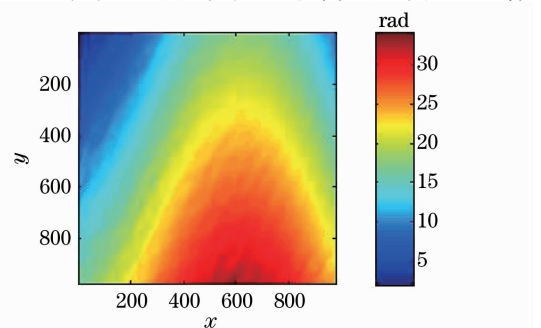


图 7 被测区域温度场分布变化图(解包裹)

Fig. 7 Distribution of temperature field (unwrapped)

左上角的温度相对较低。

## 4 结 论

采用迈克耳孙干涉架构,应用数字全息技术研究了空气中温度分布测量的问题,得到了温度分布相对变化的结果,验证了数字全息技术对于检测温度场等各种流场分布测量在技术上的优越性和灵敏度较高的特点。下一步的工作还包括 Gladstone-Dale 常数的测定和(4)式中  $l$  的测定等。数字全息技术可与计算机图像处理技术高度结合,如能进一步采用计算机视频处理方法,不仅可将其用于各种流场分布的测量,还可对这些流场(如各种尾流场、密度场)的变化过程开展研究。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, P. W. Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 M. D. Angelis, S. D. Nicola, A. Finizio. Digital holography refractive-index-profile measurement of phase gratings[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(11): 111114
- 3 P. Marqueta, B. Rappazb, F. Charrierec. Analysis of cellular structure and dynamics with digital holographic microscopy [C]. *SPIE*, 2007, **6633**: 66330F
- 4 C. Wagner, W. Osten, S. Seebacher. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multiwavelength contouring[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 79~85
- 5 I. Yamaguchi. Image formation and measurement of surface shape and deformation by phase-shifting digital holography[C]. *SPIE*, 2005, **5642**: 66~77
- 6 S. Takao, S. Yoneyama, M. Takashi. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry[J]. *Opt. Laser. Engng.*, 2002, **38**(5): 233~244
- 7 J. L. Valin, E. Goncalves, F. Palacios. Methodology for analysis of displacement using ditital holography[J]. *Opt. Laser. Engng.*, 2005, **43**(1): 99~111
- 8 V. Kebbel, H. J. Hartmann, W. P. O. Juptner. Characterization of micro-optics using digital holography[C]. *SPIE*, 2000, **4101**: 477~483
- 9 C. D. Depeursinge, E. CuChe, P. Marquet *et al.*. Digital holography applied to microscopy[C]. *SPIE*, 2002, **4659**: 30~34
- 10 Wen Xueda, Liu Zhao, Zhou Huijun *et al.*. Reproduction of the temperature field of candle flame using Michelson interferometer[J]. *Physics Experimention*, 2007, **27**(6): 44~47  
温学达, 刘 钊, 周惠君 等. 利用迈克尔孙干涉仪重建蜡烛火焰温度场[J]. *物理实验*, 2007, **27**(6): 44~47