

文章编号: 1001-3806(2011)05-0589-04

## 数字全息和拉东变换重构温度场的研究

王占亮, 张永安\*, 钱晓凡  
(昆明理工大学 激光研究所, 昆明 650051)

**摘要:** 为了得到温度场的3维温度分布情况, 采用数字全息方法, 并将拉东变换的图层重建理论应用到数字全息的后期图像处理过程中, 进行了理论分析和实验验证, 取得了温度场的3维相位和温度数据。结果表明, 此方法重构的温度场3维数据和阿贝尔变换重构的温度场数据相一致, 证明了该方法的可行性。

**关键词:** 全息; 3维温度场; 重构; 拉东变换

**中图分类号:** O438.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.004

### Research of reconstruction of temperature field by means of digital holography and Radon transform

WANG Zhan-liang, ZHANG Yong-an, QIAN Xiao-fan

(Institute of Laser, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** In order to obtain the temperature distribution of temperature field, using of the digital holography, adopting the reconstruction theory of drawing layer based on Randon transform into the final image processing in digital holography, after theoretical analysis and experimental validation, 3-D phase and temperature data of the temperature field were obtained. The 3-D temperature reconstructed with this method is conformal with that reconstructed with Abel method so that it is feasible.

**Key words:** holography; 3-D temperature field; reconstruction; Randon transform

## 引言

全息干涉计量作为一种高精度、无损、全场的检测方法, 可用于非破坏检测与评估、流场分析、燃烧分析、固体的应力与应变分析、振动分析等<sup>[1]</sup>, 该方法是用一个标准波前与一个变形波前比较实现干涉计量, 这种非接触的激光全息干涉计量法已大量应用到热流体温度场测量中<sup>[2]</sup>, 并经历了从传统全息到数字全息<sup>[3]</sup>等几个阶段。

拉东变换是奥地利数学家 RADON 于 1917 年提出的一种积分变换, 现已广泛使用在医学成像、光学和全息干涉量度学、地球物理学、射电天文学等领域。近年来, 离散拉东变换已经获得飞速发展, 使得拉东变换在纯粹的图像处理领域得到越来越广泛的应用<sup>[4]</sup>。

由于温度改变空气折射率进而改变通过温度场光波的相位, 本实验正是利用激光光束对温度场进行投影记录, 编程从投影的全息图中解出相位, 利用拉东变换重构出温度场相位变化情况, 再利用温度、折射率与

相位的关系重构出温度场的温度场量。

## 1 基本原理

### 1.1 全息干涉原理

全息干涉计量法是对同一物体在两个不同时刻的光场用光场干涉的方法进行比较, 从而探测物体在这段时间间隔内所发生的变化, 其精度可以达到波长量级。

在全息记录面上的总光强为<sup>[5]</sup>:

$$I_1 = |\tilde{R}(x, y) + \tilde{O}_1(x, y)|^2 = |\tilde{R}|^2 + |\tilde{O}|^2 + RO\exp[j(\phi_o - \phi_r)] + RO\exp[-j(\phi_o - \phi_r)] \quad (1)$$

式中,  $\tilde{R}(x, y)$  表示参考光,  $\tilde{O}_1(x, y)$  表示物体变形前物光波,  $\phi_o$  表示物体变形前物光波的初始相位,  $\phi_r$  是参考光的初始相位。

物体变化后, 全息记录面上物光波为:

$$\tilde{O}_2(x, y) = O(x, y)\exp[-j\phi_o'(x, y)] \quad (2)$$

$\phi_o'$  表示物体变形后物光波的初始相位。参考光不变, 此时全息面上记录的总光强为:

$$I_2 = |\tilde{R}(x, y) + \tilde{O}_2(x, y)|^2 \quad (3)$$

将两次记录的光强进行叠加, 相当于两次曝光, 有:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) = |\tilde{R}|^2 + |\tilde{O}|^2 + RO\exp[j(\phi_o' - \phi_r)] + RO\exp[-j(\phi_o' - \phi_r)] =$$

作者简介: 王占亮(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究激光应用技术和光电信息处理技术。

\* 通讯联系人。E-mail: zya6597@sina.com

收稿日期: 2010-12-06; 收到修改稿日期: 2011-03-30

$$2(|\bar{R}|^2 + |\bar{O}|^2) + RO\exp[j(\phi_o - \phi_r)] + RO\exp[-j(\phi_o - \phi_r)] + RO\exp[j(\phi_o' - \phi_r)] + RO\exp[-j(\phi_o' - \phi_r)] \quad (4)$$

再用原来的记录参考光再现时,与原始物光波和变形物光波有关的分量为:

$$U_i = OR^2 \exp(-j\phi_o) + OR^2 \exp(-j\phi_o') \quad (5)$$

干涉条纹的强度为:

$$I_i = I_o[1 + V\cos(\phi_o - \phi_o')] \quad (6)$$

式中,  $V$  为条纹可见度。可见干涉条纹的强度分布按余弦规律变化,反映了物体变化前后的相位信息,但条纹的可见度比较低。全息干涉计量适合于研究物体的变化情况,因而很方便用于温度场分布检测,以及透明物体内部变化的测量。

### 1.2 拉东变换

拉东函数就是计算图像沿着指定方向的投影。一个二元函数  $f(x, y)$  的投影为一个特定方向的线性积分<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。例如,  $f(x, y)$  在垂直方向的线性积

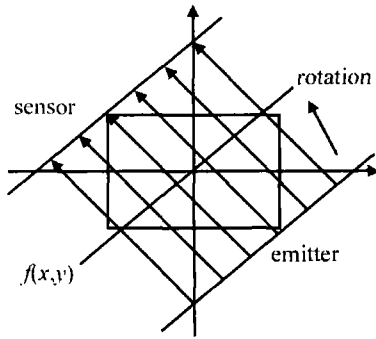


Fig. 1 The perspective projection of  $f(x, y)$

分是  $f(x, y)$  在  $x$  轴上的投影,而水平方向的线性积分对应  $y$  轴上的投影。图像函数  $f(x, y)$  在任意一个角度上的拉东变换的定义式为:

$$G_\theta(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos\theta - y' \sin\theta, x' \sin\theta + y' \cos\theta) dy' \quad (7)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

$f(x, y)$  表示待处理的图像;  $\theta$  表示拉东变换的方向角度,可以是一个标量或向量值;  $G_\theta(x')$  为对应图像  $f(x, y)$  在  $\theta$  角度的拉东变换值。

拉东变换的逆变换是通过计算不同投影角度的投影图来重构出原始图像,本实验正是利用激光光束对温度场进行投影记录,从投影的全息图中解出相位,再利用拉东变换重构出温度场相位场量,最后利用温度影响空气折射率与光波相位的关系计算出温度场的变化情况。

## 2 实验及结果

### 2.1 实验光路

实验中采用 He-Ne 激光对功率为 200W 的电烙铁在 220V 电压下所产生的温度场进行照射,用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)记录温度场变化前后的全息干涉图。实验光路如图 2 所示:  $B$  为扩束镜,  $H$  为针孔滤波器,  $I$  为成像透镜,  $L$  为透镜;激光器的光束被分束镜 (beam splitter, BS)  $BS_1$  分为两束,其中一束经反射镜  $M_2$  反射后,再经  $B$  会聚、 $H$  滤波和  $L$  准直后成为平行光,被分束镜  $BS_2$  反射后作为参考光到 CCD;另一束激光经反射镜  $M_1$  反射再经会聚、滤波、准直成为平行光,透过温度场经分束镜  $BS_2$  作为物光到达 CCD 上,电烙铁  $O$  在 220V 电压下达到稳定的温度后,用 CCD 采集全息图。

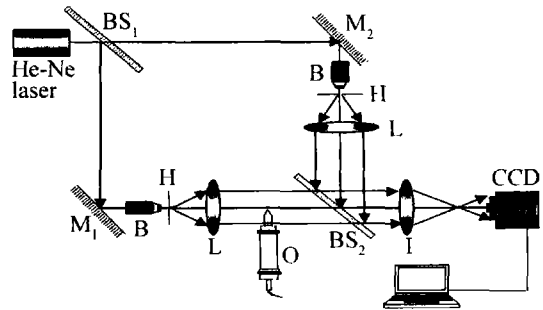


Fig. 2 Experimental setup

所用 CCD 感光面尺寸为  $6.5536\text{mm} \times 4.9152\text{mm}$ , 像素总数为  $2048 \times 1536$  个,像素间距是  $3.2\mu\text{m}$ ,光场被会聚透镜  $I$  汇聚到 CCD 面上,被 CCD 采集到的实际光场宽度为  $5.6\text{cm}$ ,高度为  $4.2\text{cm}$ 。为了方便衍射计算,实际计算时取原始全息图 ( $2048 \times 1536$ ) 的中间部分 ( $1536 \times 1536$ ) 进行全息再现。

### 2.2 实验结果

实验中用 CCD 记录电烙铁温度场变化前后的全息干涉图,如图 3 所示。图 3a 未加电压的全息图。图 3b 加电压后电烙铁产生稳定温度后的全息图。用

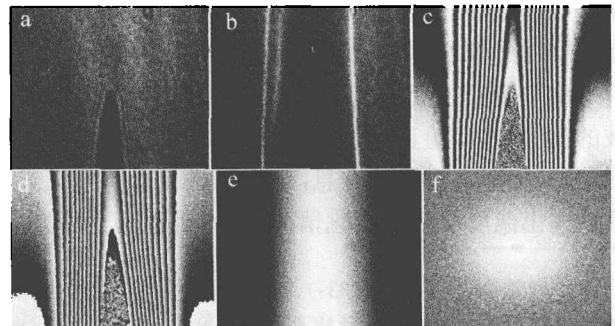


Fig. 3 The hologram and phase diagram of temperature

a—the hologram before temperature changed b—the hologram after temperature changed c—experimental interference fringes d—wrapped phase e—unwrapped phase f—a layer distribution of phase

MATLAB 编程模拟双曝光再现原理对全息图(见图 3a 和图 3b)进行模拟再现,求出其温度变化前后光场干涉图,见图 3c。

对包裹的相位图进行解包裹,本文中采用基于离散泊松方程解的相位展开方法,借助快速离散余弦变换求解  $M \times N$  矩形网格上具有诺埃曼边界条件的离散泊松方程,从而解出相位分布的最小二乘解,该方法能够有效解决由于相位图中存在噪声、断点、孔洞等奇异点所产生的相位跳变现象<sup>[7-8]</sup>,通过对权重因子的调整,得到较理想的结果。图 3d 为包裹相位图,图 3e 为解开的相位图。

由拉东变换原理可知,解开的相位图的每一层是对应温度场某一高度层的投影积分。电烙铁温度场具有轴对称性,可假想每个角度的投影都是完全一样,因此实验中只拍一个角度就行。重构出的每个相位图层的分辨率  $418 \times 418$ ,对应的实际横向尺寸  $3.8\text{cm} \times 3.8\text{cm}$ 。相位图的垂直分辨率是 396(层),对应实际高度是 3.6cm。将解开的相位图(见图 3e)的第 160 层(实际高度  $1.45\text{cm}; 3.6/396 \times 160\text{cm}$ )利用拉东变换的逆变换重构本层的相位场量,如图 3f 所示,中心暗斑为电烙铁的位置。

将解包裹后相位图的每一层都用拉东变换逆变换重构该层的相位图层,并组合各个相位图层,重构出 3 维立体图形,使用切片图来表示其 4 维场量<sup>[9]</sup>,如图 4 所示,对称轴下半部分为电烙铁的位置。图 5 是用同样方法对蜡烛燃烧温度场的相位变化重构所得的结果。

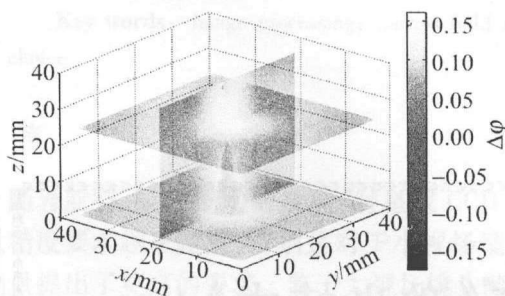


Fig. 4 Phase distribution of iron of 3-D temperature field

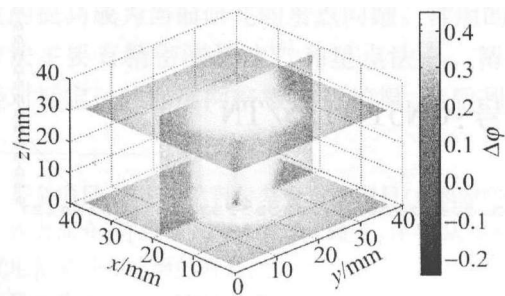


Fig. 5 Phase distribution of flame of 3-D temperature field

根据相位差与折射率之间关系<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda}[n(x,y) - n_0]\Delta L \quad (9)$$

式中,  $\Delta L$  为相位图像素间距的实际尺寸,  $n_0$  是待测场原始折射率分布,  $n(x,y)$  是相位变化后的待测温度场的折射率分布,  $\lambda$  为测量光波波长。

利用 Gladstone-Dale 公式  $\frac{n-1}{\rho} = K$  及理想气体状态方程  $pV = nCT$  (其中,  $\rho$  是空气密度,  $V$  为体积,  $p$  为大气压强,  $C$  为气体普适常量), 则有:

$$T = \frac{KM}{n-1} \frac{p}{C} = \left[ \frac{n_0-1}{n-1} \right] \frac{p}{p_0} T_0 \quad (10)$$

式中,  $K$  为 Gladstone-Dale 常数,  $M$  为气体分子量,  $p_0$  为初始压强,  $T$  为所求温度场的温度值,  $n$  为加热后温度场的空气折射率分布,  $n_0$  为室温下温度场的空气折射率分布,  $T_0$  为室温温度。因此,在一定的实验的环境下,由(9)式和(10)式可以将拉东变换逆变换所得的相位分布图还原为温度分布图。图 6 和图 7 分别是还原出的电烙铁和蜡烛温度场的温度分布图,横坐标  $L$  是相位图的测量尺寸。图 6 中曲线中央凹陷部分对应电烙铁的遮挡,由图可知,电烙铁的表面温度最高,越向外温度越低。从图 7 中可以看出,蜡烛的内焰温度低于外焰。实验中还将在拉东变换逆变换还原的温度与阿贝尔变换法还原的结果进行了对比,如图 8 所示,横坐标  $r$  是以蜡烛轴心为坐标原点的半径,实线是拉东变换还原的温度曲线,含有实验和算法上的噪声;虚线为阿贝尔变换还原的温度曲线,两个曲线在外焰部分重合很好,证明了该方法的可行性。

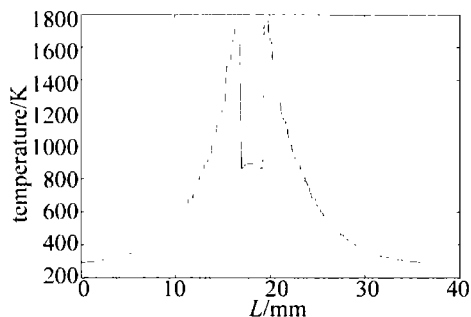


Fig. 6 Temperature distribution of iron in 160 layer of 3-D temperature field

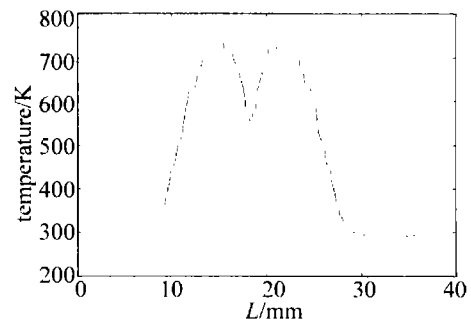


Fig. 7 Temperature distribution of flame in 50 layer of 3-D temperature field

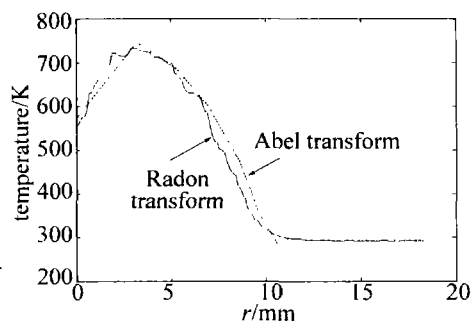


Fig. 8 Reconstruction comparison of temperature field by using Radon transform and the Abel transform results

### 3 结论

采用无损数字全息法用激光对温度场进行扫描,以全息图形式记录了温度场中不同温度引起的光波相位变化情况,经过计算机编程模拟再现,得出温度场相位变化的投影积分,再利用拉东变换逆变换重构出3维温度场的场量。最后恢复的3维温度场有少许误差,原因在于全息图的再现、相位解包裹、3维图像重构这3个过程都是在计算机上实现的,由于算法上的各自特点,特别是基于离散泊松方程解的相位展开方法,该方法有平滑作用,使得解出的相位和实际相位会有一点误差,但不影响定性研究温度场。研究者可根据不同实验情况尝试各种新的相位解包裹方法及用3维重构算法进行3维场量重建,相信随着科学技术的发展,会逐步完善每一步,最终达到无误的定量研究。

### 参考文献

- [1] FAN M X, ZHANG Y A, LI Zh F. Application of reflecting real-time digital holography in thermal stress field of rock[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 502-505 (in Chinese).
- [2] OI J A, LEUNG C W, WONG W O, *et al.* Temperature-field measurements of a premixed butane/air circular impinging-flame using reference-beam interferometry [J]. *Applied Energy*, 2006, 83 (12): 1307-1316.
- [3] WANG L, FENG Sh T, NIE Sh P, *et al.* Single exposure 3-D object digital holography based on multi-filtering technique[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 354-357 (in Chinese).
- [4] HAO Y, WANG L Q. An improved algorithm of forstner operator in the application of peaking value measurement in the Radon transform [J]. *Microelectronics and Computer*, 2008, 25 (12): 190-193 (in Chinese).
- [5] WANG X, JI J Q, ZHANG H Zh, *et al.* Study of laser transmission welding of plastics based on holographic technology[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 510-512 (in Chinese).
- [6] WANG J W, LI Y J. *Graphics image processing MATLAB 7.0* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 190-191 (in Chinese).
- [7] QIAN X F, WANG Zh L, ZHANG H T, *et al.* Vibration amplitude distribution measurement using phase of reconstructed wave in time-average digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 523-528 (in Chinese).
- [8] QIAN X F, ZHANG Y A, LI X Y, *et al.* Phase unwrapping algorithm based on mask and least-squares iteration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 440-444 (in Chinese).
- [9] CHEN Y G, MAO T T, WANG Zh L. *Proficient in MATLAB GUI design* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 125-126 (in Chinese).
- [10] ZHU D Zh. *Thermal physics laser measurement technology* [M]. Beijing: Science Press, 1990: 1-8 (in Chinese).

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2012 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN