

基于数字全息层析的温度场三维检测方法

肖文, 赵晨晓, 潘锋, 李艳, 杨洪建

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 教育部精密光机电一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 提出一种结合数字全息干涉测量原理和计算层析迭代原理的温度场三维检测方法。首先, 基于光纤传导的离轴数字全息光路, 通过旋转记录多角度的数字全息图。然后, 对全息图进行数值重构, 获得多角度上的定量相位分布, 以此作为计算层析迭代的投影数据, 并采用层析迭代算法重建三维折射率场分布。最后, 基于折射率与温度之间的关系, 反演得到三维温度场分布。基于上述方法搭建了实验系统并开展实验验证, 实验测量结果与温度场预测分布基本一致, 证明了该方法在对温度场三维检测的可行性。

关键词: 数字全息; 计算层析迭代算法; 温度测量; 折射率三维分布; 温度三维分布

中图分类号: TN98-34; O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2015)04-0121-03

Three-dimensional temperature detecting method based on digital holographic tomography

XIAO Wen, ZHAO Chen-xiao, PAN Feng, LI Yan, YANG Hong-jian

(Education of Ministry Key Laboratory of Precision Optical Electromechanical Integration, School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A detecting method for 3-D temperature distribution is proposed in combination with digital holographic interferometry principle and iterative tomography algorithm. The off-axis digital holographic optical path based on fiber optical conduction is designed and optimized. The multi-angle digital holograms are recorded by rotation. The accurate phase data is calculated by means of the recorded multi-angle digital holograms. The obtained multi-angle phase distributions are used as projections of iterative tomography algorithm to reconstruct the 3-D refractive index distribution. The 3-D temperature field can be determined by the quantitative numerical relation between the refractive index and the temperature. Based on the above method, an experiment system was built up and the experiment verification was carried out. The measured temperature is in good agreement with the prediction temperature distribution. It demonstrates that digital holographic tomography is a feasible and accurate method for temperature field detection.

Keywords: digital holography; iterative tomography algorithm; temperature detection; 3-D refractive index distribution; 3-D temperature distribution

0 引言

温度检测对各个领域的研究、应用都有着非常重要的意义。传统的温度测量方法多是对“点”的温度测量, 目前对整个温度场及空间的温度分布测量成为一个重要研究方向。光学测量方法以其非接触、快速响应测温等优点得到越来越被广泛的应用^[1]。在现有的光学测量方法中, 数字全息干涉测量技术^[2-4]以全场测量、非接触、高分辨率、快速实时等优势成为研究热点。

Xiao等人基于离轴菲涅耳数字全息原理, 通过模拟

仿真重构轴对称火焰温度分布^[5]。Shakher等人采用剪切干涉和傅里叶条纹分析术测量了轴对称火焰剖面的温度分布^[6]; 而后采用无透镜傅里叶全息技术测量了自然对流条件下水稳层上方的温度分布^[7]。国内李艳等人采用无透镜傅里叶全息技术测量了一维定量温度场分布^[8]。但上述研究结果仅给出温度场在测量方向上的一维或二维分布和假设轴向对称的温度场分布测量。为了获得温度场在三维空间上分布情况, 有研究者将数字全息和计算层析技术^[9-11]相结合。Tomioka等人将傅里叶全息和最大似然层析算法相结合实现了三维温度场的重建^[12]。但是, 傅里叶全息在全息记录时要求参考点光源与物平面位于一个平面上, 同时为了使原始像与共轭像不受零级项的影响, 参考点光源到物体中心的距离

要满足一定的条件^[13]。此外,最大似然层析算法较为复杂,计算速度较慢,制约了测量效率^[14]。本文提出一种基于离轴数字全息干涉测量技术并结合计算层析迭代算法的温度场三维检测方法。在全息光路方面,设计了一种基于光纤传导的离轴数字全息干涉测量系统,通过旋转记录多角度数字全息图,数字再现得到各角度上的相位分布。在层析重建方面,采用计算层析迭代算法^[15]以再现的多角度下的相位数据作为层析迭代的投影,数值重建得到三维折射率场分布。进而,基于折射率与温度之间的定量数值关系,定量重建了三维温度场分布。最后,搭建实验系统并开展实验研究,实验结果与实际温度场预测分布基本一致,证明该方法在三维温度场检测的可行性。

1 理论分析

在温度变化的介质空间,温度的改变会导致介质密度的变化,进而引起介质折射率的改变,由此依据 Gladstone-Dale 公式可以给出折射率与温度间的定量数值关系^[16]。当光波穿过存在温度变化的介质空间,其波振面被调制。因此,透射光波将携带该区域的温度分布信息。在空气折射率变化较小的情况下,光波在空气中的传播可近似为直线传播。在此条件下,透射光场的相位分布满足关系^[17]:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l [(n - n_0)] dl = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l (\Delta n) dl \quad (1)$$

式中: l 是光波通过温度场的几何路径; n 为温度场的空气折射率分布; n_0 周围环境介质折射率分布; Δn 为温度场与周围环境介质间折射率差异的空间分布。

基于数字全息技术,以透射光波作为物光波进行全息记录与再现,就可定量获得温度场的透射光波的相位分布。由式(1)可知,其相位值是沿光束传播方向的折射率积分。为了获得三维空间折射率分布,采用计算层析技术,通过多角度记录全息图获取多角度下的相位数据,以此作为层析投影数据,利用计算层析重建算法,重构温度场的三维折射率分布。进一步根据折射率与温度的定量数值关系,重建得到三维温度场分布。

1.1 数字全息基本原理

数字全息技术在记录过程中采用光电传感器记录干涉图样得到离散化的数字全息图,在重建过程中通过数值模拟物光波从全息图平面到再现平面的衍射传播,得到再现平面的物光波复振幅分布。在满足菲涅尔近似条件^[18]下,得到穿过温度场物光波的复振幅分布为:

$$\Psi(m, n) = A \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta \xi^2 + n^2 \Delta \eta^2)\right\} \text{FFT}[I_H(k, l) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta z^2)\right\}] \quad (2)$$

式中: $I_H(k, l)$ 是离散化全息图,像素数为 $M \times N$; d 为再现距离; λ 是光波波长; A 是一个复常数,CCD 的像元尺寸为 $\Delta x \times \Delta z$,再现得到的像元尺寸为 $\Delta \xi \times \Delta \eta$ 。再现得到温度场的相位分布为:

$$\phi(m, n) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[\Psi(m, n)]}{\text{Re}[\Psi(m, n)]}\right) \quad (3)$$

式中 $\text{Re}[\Psi(m, n)]$ 和 $\text{Im}[\Psi(m, n)]$ 分别是重建得到的温度场物光波前的实部和虚部。

1.2 计算层析迭代原理

计算层析迭代算法用于实现“非完全数据”下的图像重建,其基本思想是将投影视为图像矩阵中各点的加权线性组合。因此将数字全息获得的折射率积分投影数据表示为:

$$p_i = \sum_{j=1}^V w_{ij} \Delta n_j, \quad i = 1, 2, \dots, U \quad (4)$$

式中: U 为射线总数; V 为像素总数; w_{ij} 是加权因子,即为第 i 条射线在第 j 号像素内的长度。采用层析迭代 ART 算法 (Algebraic Reconstruction Technique) 进行迭代重建,迭代方程为:

$$\Delta n_j^{(t+1)} = \Delta n_j^{(t)} + r \cdot \frac{p_i - \sum_{j=1}^V w_{ij} \Delta n_j^{(t)}}{\sum_{j=1}^V w_{ij}^2} w_{ij} \quad (5)$$

式中: t 为迭代次数; r 为松弛因子;取值范围在 0~2 之间。层析迭代时输入各个方向的投影值 p_i , 赋初值 $\Delta n_j^{(0)} = 0$ 进行迭代运算。当 $p_i - \sum_{j=1}^V w_{ij} \Delta n_j^{(t)} = 0$ 时迭代结束, $\Delta n_j^{(t+1)}$ 为重建结果。

2 测温装置与测试

设计的数字全息测温系统光路如图 1 所示。测量的温度场是功率为 200 W 的电发热源形成的稳定向上辐射的温度场,电发热源置于旋转平台中心。电发热源形成的温度场示意图如图 2 所示,电发热源的顶点位于坐标系的原点位置,并将其顶点处温度设置为 623 K,其辐射方向沿 z 轴方向, xy 面为发热面。全息记录系统采用光源波长为 532 nm 的激光器,其输出光束经偏振分光棱镜 PBS 分为温度场照明物光波和参考光波。采用两根单模保偏光纤对光束进行滤波并传导,物光波经光纤耦合器 CP1 耦合到单模保偏光纤 F_1 中。在输出端经准直透镜 L_1 变为平面光波输出,经温度场衍射后携带温度分布信息。参考光波经光纤耦合器 CP2 耦合到单模保偏光纤 F_2 中,在输出端经准直透镜 L_2 变为准平面光波输出。物光波和参考光波经 BS 合光后以微小夹角在 CMOS 相机靶面相干叠加后生成干涉图样。通过调节

反射镜 M_1 来获取离轴角,并通过调节 $\lambda/2$ 偏振片来改变物、参光强比例,以获得较高条纹对比度全息图。

测量过程中,将电动旋转平台的 0° 位置作为基准位置,首先,在室温 (25 ± 1) $^\circ\text{C}$ 下记录一幅基准全息图,然后给电发热源通电,待温度稳定后绕着温度场的轴向方向即 z 轴方向转动旋转平台,记录不同 θ 角度下的 30 幅数字全息图,实验过程中保持周围环境稳定。

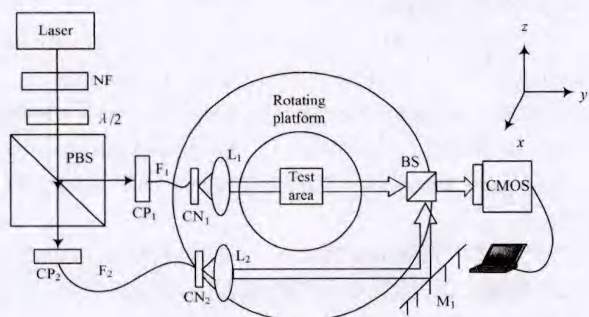


图1 数字全息测温光路系统

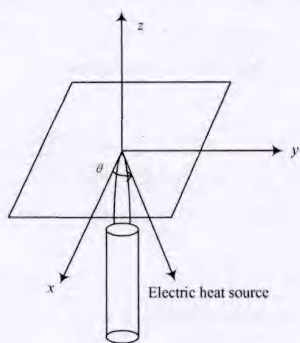


图2 温度场示意图

到被测场在各个断层面的折射率二维分布,从而重建出被测场的折射率三维分布。最后,根据折射率与温度之间的定量数值关系获取温度场的三维分布,如图4所示。

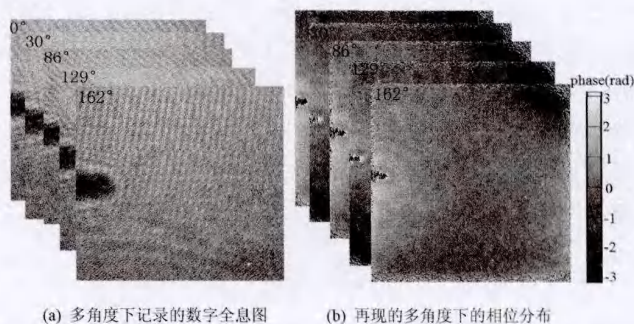


图3 数字全息记录和再现结果图

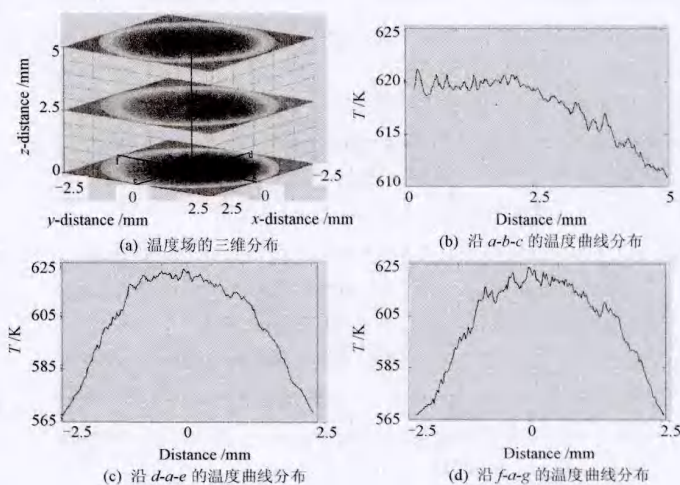


图4 被测场的温度分布

3 实验结果及分析

首先,对获取的 30 幅数字全息图进行切趾预处理,以减小边缘衍射引起的光场起伏,并通过频域滤波祛除零级项和共轭像的影响。接着采用菲涅耳再现算法对数字全息图进行数值再现,同时采用参考全息图方法对实验过程中可能出现的相位误差进行校正,以获取无畸变的定量相位信息。图3为数字全息记录和再现结果,图3(a)为不同 θ 角度下记录的数字全息图,图3(b)为不同 θ 角度下数值重建的波前相位图。进一步,以不同角度下的相位分布作为计算层析迭代的投影数值,进行层析重建。首先,沿 z 轴方向将被测温度场分成 256 层断面,断面厚度为 $24 \mu\text{m}$,对应于数值再现相位图中的 256 行相位,每个投影方向的射线数为 256 条,射线宽度为 $24 \mu\text{m}$ 。然后,采用 ART 算法实现代数层析迭代重建,加权因子采用非线性加权取值方式^[19]。层析迭代得

其中,图4(a)为沿 z 轴方向即电发热源辐射方向的温度三维分布图;图4(b)为图4(a)中沿 z 轴中心轴线方向 $a-b-c$ 的温度曲线,由测量结果可以看到温度在电发热源顶点位置处达到最高,温度为 621.5 K ,与设定温度相差 1.5 K 。并且,在 z 轴中心轴方向温度较高温度变化范围为 ($611 \text{ K}, 621.5 \text{ K}$),主要因为该方向是电发热源辐射方向,由于对流效应使得温度迅速升高;图4(c)为图4(a)中底层切片上沿 $d-a-e$ 的温度曲线,温度曲线呈抛物线式分布,在电发热源顶点位置处温度达到最高;图4(d)为图4(a)中底层切片上沿 $f-a-g$ 的温度曲线,温度曲线呈抛物线式分布,在电发热源顶点位置处温度达到最高。实验测量结果与电发热源周围实际温度场预测分布一致,验证了本方法的正确性与可行性。

4 结论

本文将离轴数字全息干涉测量技术和计算层析迭

代算法相结合,实现了自由空间三维温度场分布的重建。首先,采用光纤传导光路,并通过步进电机旋转记录多角度全息图。接着,对所获得的全息图进行数值重构,以再现相位数据作为计算层析迭代的投影数值,重建三维折射率场分布。最后,基于折射率与温度之间的定量数值关系获取温度场的三维分布。开展了实验分析,重构温度分布与实际温度场预测分布一致,证明该方法在对温度场三维检测的可行性。而且该测量方法可以实现快速、现场检测,并且无干扰,具有较好的发展和应用前景。

参 考 文 献

- [1] 黄素逸,杨金宝.热物理量的光测[M].武汉:华中理工大学出版社,1985.
- [2] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formulation from electronically detected holograms [J]. Applied Physical Letters, 1967, 11(3): 77-79.
- [3] SCHNARS Ulf, JUEPTNER Werner. Digital Holography [M]. Germany: Verlag Berlin Herdelberg, 2005.
- [4] 潘锋,肖文,常君磊,等.基于光纤导光的数字全息微形变测量系统[J].现代电子技术,2011,34(9):111-113.
- [5] XIAO Xu-dong, PURI I K. Digital recording and numerical reconstruction of holograms: an optical diagnostic for combustion [J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 3890-3899.
- [6] SINGH P, FARIDI M S, SHAKHER C. Measurement of temperature of an axisymmetric flame using shearing interferometry and Fourier fringe analysis technique [J]. Optical Engineering, 2004, 43(2): 387-392.
- [7] HOSSAIN M M, SHAKHER C. Temperature measurement in laminar free convective flow using digital holography [J]. Applied Optics, 2009, 48(10): 1869-1877.
- [8] LI Yan, WANG Da-yong, WANG Guang-jun. Measurement of temperature field in the region near to radiator by using digital holography [J]. Proc of SPIE, 2009, 7382: 401-408.
- [9] ZYSK A M, JOSH R J, MARKS D L, et al. Projected index computed tomography [J]. Optics Letters, 2003, 28(9): 701-703.
- [10] 姚红兵,贺安之.光学层析重建算法改进的研究[J].光学学报, 2004, 24(2): 158-161.
- [11] KOU S SHEPPARD C. Image formation in holographic tomography [J]. Optics Letters, 2008, 33(20): 2362-2364.
- [12] TOMIOKA Satoshi, NISHIYAMA Shusuke. Nondestructive three-dimensional measurement of gas temperature distribution by phase tomography [J]. Proc of SPIE, 2012, 8296: 171-179.
- [13] 吕乃光.傅里叶光学[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.
- [14] 刘诚,王德忠,戚屯锋,等.核废物桶放射性探测的层析扫描技术[J].上海交通大学学报,2010,44(9):1287-1291.
- [15] MISHRA D, LONGTIN J P, SINGH R P, et al. Performance evaluation of iterative tomography algorithms for incomplete projection data [J]. Applied Optics, 2004, 43(7): 1522-1532.
- [16] VIST C M. Holographic interferometry [M]. New York: Wiley, 1979.
- [17] CHARRIERE F, PAVILLON N, COLOMB T, et al. Living specimen tomography by digital holographic microscopy: morphology of testate amoeba [J]. Optics Express, 2006, 14(16): 7005-7013.
- [18] SCHNARS Ulf, JUEPTNER Werner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms [J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(9): 85-101.
- [19] 周文静,胡文涛,郭路,等.少量投影数字全息层析重建实验研究[J].物理学报,2010,59(12):8499-8511.

作者简介:肖文(1962—),男,陕西人,教授,博士。主要从事光纤传感、振动检测方面的研究。

赵晨晓(1990—),女,河南人,硕士。主要从事数字全息、计算层析方面的研究。

潘锋(1979—),男,广西人,副教授,博士。主要从事基于数字全息的三维显微成像、相干检测研究。

(上接第120页)

参 考 文 献

- [1] YIU Joseph. Cortex-M3权威指南[M].宋岩,译.北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [2] VLSI公司.VS1003中文说明书[EB/OL].[2011-04-07].http://wenku.baidu.com.
- [3] 张阳天,韩昇凡.Protel DXP电路设计[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [4] VLSI公司.VS1003-MP3/WMA AUDIO CODE数据手册[EB/OL].[2005-06-07].http://download.csdn.net/detail/zhongpai/4392299.
- [5] 陈杰.基于ARM平台的MP3编码器的实现及性能优化[D].上海:上海交通大学,2007.
- [6] 李国辉.基于ARM的MP3播放器设计与实现[J].现代电子技术,2012,35(16):1-2.

作者简介:李伟(1983—),女,河南南阳人,硕士,讲师。主要研究方向为移动通信与无线网络技术。

张真(1992—),男。研究方向为通信工程。