

# 基于哈特曼波前探测层析重建折射率场

戴 云<sup>1,2</sup> 张雨东<sup>1</sup> 李恩德<sup>1</sup> 王海英<sup>1</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 介绍了哈特曼层析测量系统的原理, 设计静态测试实验, 对实际圆对称折射率场分布进行了层析重建. 系统由哈特曼采集折射率场的投影数据, 采用代数重建算法进行层析重建, 取得了满意的重建结果.

**关键词** 信息光学; 层析; 哈特曼; 重建

**中图分类号** O438; TN247 **文献标识码** A

## 0 引言

光学计算机层析技术(OCT)是计算机层析技术(CT)的分支, 它在流场研究<sup>[1]</sup>、温度场测量<sup>[2,3]</sup>、等离子体诊断<sup>[4]</sup>等方面显示出极大的优越性. 物理场的测量已有多种测试方法: 全息干涉法<sup>[5]</sup>、纹影法、阴影法、莫尔偏折法<sup>[4]</sup>、散斑法<sup>[6]</sup>及激光诱导荧光法<sup>[7]</sup>等. 它们各有其优点, 也有其不足之处. 干涉法是以波长为基准的高准确度测量方法, 必须在严格防震的条件下工作, 对测试环境要求高, 工程应用较为困难. 另外干涉法也不适于折射率梯度大的场测量; 纹影法、阴影法由于忽略了光学系统的衍射效应, 在场的定量计算时存在较大误差, 因此多用于流场的定性显示; 莫尔偏折法、散斑法的数据处理较为复杂, 费时费力; 激光诱导荧光法与分子激发态有关, 由于受到猝灭的影响而产生较大误差等等.

哈特曼波前传感器是一种常见的波前探测器, 已广泛应用于自适应光学系统<sup>[8]</sup>、激光光束质量诊断、光学检测<sup>[9]</sup>等诸多领域. 基于哈特曼波前探测的流场层析重建系统<sup>[10]</sup>(以下简称为 HS-TOMO 系统)通过哈特曼探测光束穿过流场后的波前斜率, 采用计算机层析技术重建流场折射率的空间分布, 它是一种新型的流场测量方法, 具有结构原理简单、数据处理方便、动态范围可调整 and 实时性好等诸多优点. 本文详细介绍了哈特曼层析测量系统的原理并设计了静态测试实验, 对实际圆对称折射率场分布进行了层析重建. 系统由哈特曼采集折射率场投影数据, 采用代数重建算法(ART)层析重建, 得到了满意的测量结果.

## 1 HS-TOMO 层析重建原理

### 1.1 哈特曼波前传感器的探测原理

哈特曼波前传感器的工作原理如图 1.

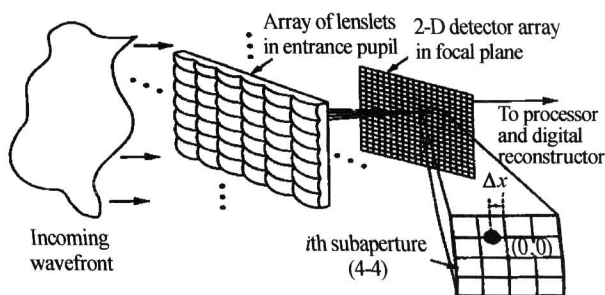


图 1 哈特曼波前传感器原理图

Fig. 1 Block diagram of Shack-Hartmann wavefront sensor

被测波面经微透镜阵列分割成许多子孔径, 透过每个微透镜的光波可近似为平面波, 并聚焦到 CCD 靶面上, 光斑质心坐标 $(x_c, y_c)$ 的计算公式为

$$x_c = \frac{\sum_{ij} x_i I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}}, \quad y_c = \frac{\sum_{ij} y_j I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $x_i, y_j$  为 CCD 靶面上第 $(i, j)$ 个像素的坐标;  $I_{ij}$  为 CCD 靶面上第 $(i, j)$ 个像素接收到的光强信号. 根据被测波前与参考波前经微透镜所形成的光斑阵列在对应子孔径的位置偏差, 可以得到入射光束波前相位在子孔径内的平均斜率

$$\Delta x = (x_c - x_{c0})/f, \quad \Delta y = (y_c - y_{c0})/f \quad (2)$$

式中:  $(x_{c0}, y_{c0})$  为参考波前的质心坐标,  $f$  为微透镜焦距. 根据测量得到的波前斜率即可恢复出波前相位.

### 1.2 HS-TOMO 层析重建原理

在 HS-TOMO 层析重建系统中, 取哈特曼传感器的一行或者一列微透镜阵列, 则其探测的是光束穿过待测流场的某个截面后的波前, 由于流场折射率的不均匀引起的光程差 OPD (Optical Path Difference) 是场折射率分布在测量方向上的线积分

$$OPD_i = \int_{l_i} (n(x, y) - n_0) dl_i \quad (3)$$

式中:  $n(x, y)$  是流场折射率分布函数,  $n_0$  为周围环境的折射率,  $l_i$  是第  $i$  条投影光线. 如果在多个方

向上检测光束经过流场后的波前斜率,利用计算机层析技术即可重建出流场在该截面上的折射率分布. HS-TOMO 系统原理如图 2.

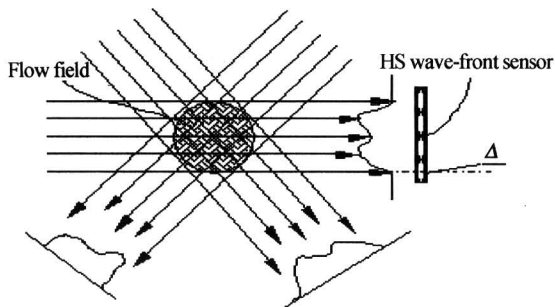


图 2 HS-TOMO 系统原理图

Fig. 2 Block diagram of HS-TOMO system

通过测量投影波前在微透镜后焦面上形成的光斑相对于中心位置的偏移量  $\Delta$ ,可以测得第  $i$  个子孔径上的波前斜率为

$$\Delta\varphi_i = \frac{\Delta_i}{f} \quad (4)$$

而第  $i$  个子孔径上的波前斜率也可以表示为

$$\Delta\varphi_i = \frac{OPD_i - OPD_{i-1}}{d} \quad (5)$$

$d$  为单个微透镜大小,  $OPD_i$  和  $OPD_{i-1}$  为第  $i$  个微透镜边缘处的光程差. 由式(5)可得

$$OPD_i = d \sum_{n=0}^i \Delta\varphi_n \quad (6)$$

由式(1)、(2)和(4)可知:由测得的  $\Delta\varphi_i$  可以算出  $OPD_i$ ,即得到折射率分布  $n(x, y)$  在各个方向的投影,由这些投影值经反投影即可重建出流场的折射率分布. 从式(3)到(6)可以看到,投影数据的获取非常简单、方便,而且当采用面阵微透镜阵列和面阵 CCD 时,可以同时测得流场的二维投影波前,从而实现流场的三维重建. 这里仅讨论二维重建的情形.

## 2 层析重建算法

层析重建算法是层析重建系统的软件核心. 对于圆对称分布场,由投影重建场分布可以用阿贝逆变换实现. 但是,阿贝逆变换不仅为奇异积分,而且会造成投影数据噪声的进一步恶化. 因此,由投影直接应用阿贝逆变换重建场分布是很困难的. 为了回避这一难题和重建算法的适用性(对圆对称和非圆对称均适用),这里采用经典的是代数重建算法 ART,其迭代公式为

$$f^m = f^{m-1} - \frac{(\omega_m f^{m-1} - p_m) \omega_m}{\omega_m \cdot \omega_m} \quad (7)$$

式中:  $f$  为重建图像,  $p_m$  为第  $m$  个投影,  $\omega_m$  为第  $m$

条投影射线的投影矩阵,  $m$  代表第  $m$  条投影射线. 当  $\|f^m - f^{m-1}\| \leq \epsilon$  时终止迭代.

对于圆对称问题,在获得一个方向上的投影数据后也即获得了待测场在任意角度上的投影. 因此,由采集到的一个方向上的投影数据合成多个方向上的数据,带入 ART 算法即可重建出待测折射率场分布.

## 3 HS-TOMO 层析重建系统静态实验

为了验证 HS-TOMO 系统的可行性和有效性,进行了系统的静态测试实验,实验原理如图 3.

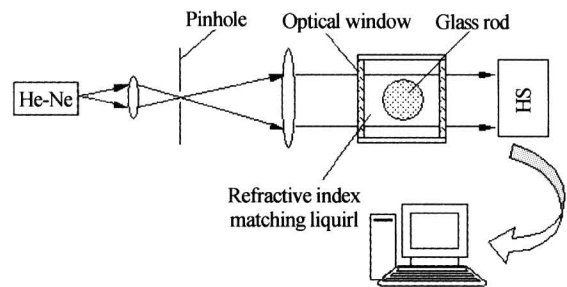


图 3 基于哈特曼的折射率场层析重建实验系统原理图

Fig. 3 Block diagram of refractive index field tomographic reconstruction based on hartmann

测试对象是由 K9 玻璃棒和折射率匹配液组成的一个静态流场分布,该流场分布具有圆对称结构. 实验步骤如下:

①光路调整,将装有折射率匹配液的玻璃池放入测量光路中,由哈特曼采集此时的波前数据.

②将玻璃棒插入折射液池中的合适位置上,采集光束穿过折射率场后的波前数据.

③对采集到的波前数据进行处理得到待测折射率场在一个方向上的投影数据.

④由采集到的一个方向上的投影数据合成多个方向上的投影数据,输入层析重建算法,得到待测折射率场折射率分布. 实验中,将投影数据合成 18 个方向上的投影数据,各投影方向在  $180^\circ$  上均布.

图 4 为哈特曼测得的一个方向上的投影数据和层析重建结果.

由层析重建结果可知:流场折射率分布为均值为 0.00136 的台阶状分布. 实验中折射液的折射率为  $n_0 = 1.5136$ ,因此流场模型(K9 玻璃棒)的绝对折射率大小为

$$n = n_0 + n_1 = 1.5136 + 0.00136 = 1.51496$$

而光学方法测得 K9 玻璃的折射率为  $n_{632.8\text{nm}} = 1.5150$ ,由此结果,不论从折射率分布和折射率值大小上看,HS-TOMO 系统层析重建均获得了令人满意的结果.

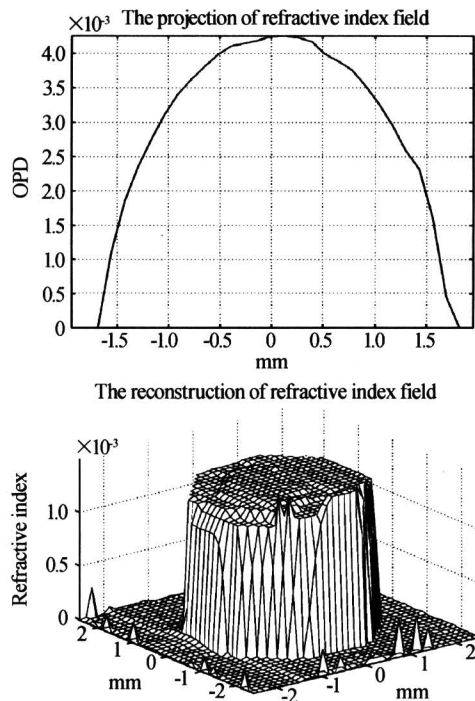


图4 折射率场投影(a)和层析重建结果(b)  
Fig. 4 The projection of refractive index field (a) and tomographic reconstruction result (b)

## 4 结论

本文介绍了一种新颖的流场层析测量系统——基于哈特曼波前探测的流场层析测量系统,该系统具有结构原理简单、数据处理方便、动态范围可调整和实时性好等诸多优点. 设计了静态验证实验,对实际折射率场进行了层析重建,取得了满意的结果. 当HS-TOMO系统采用面阵微透镜阵列和面阵CCD时,可以同时获得流场的二维投影数据,从而实现流场的三维重建. 可以预见,HS-TOMO层析重建系统在流场测量领域具有良好的应用前景.

本文的结果只是静态的圆对称流场分布,对于动态流场的层析重建实验和相应的系统设计正在进行之中,相关结果将陆续报导.

### 参考文献

1 李田泽,申晋,李秀梅. 使用莫尔层析技术诊断3-D气体密度场. 光子学报,2003,32(8):1022~1024

Li T Z, Shen J, Li X M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8):1022~1024

2 高益庆,何兴道,龚勇清. 用投影空间重投影重建迭代法重建电弧温度场. 光子学报,2001,30(2):196~200  
Gao Y Q, He X D, Gong Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(2):196~200

3 万雄,陶建文,于盛林,等. 扇束辐射层析技术重建三维流场. 光子学报,2004,33(2):252~256  
Wan X, Tao J W, Yu S L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2):252~256

4 高益庆,龚勇清. 用莫尔计算机层析技术诊断三维电弧温度场. 光学学报,1998,18(3):376~380  
Gao Y Q, Gong Y Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(3):376~380

5 贺安之,王振东. 光学干涉层析仪的设计与信息处理研究. 光电子·激光,2001,12(7):707~711  
He A Z, Wang Z D. *J of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(7):707~711

6 Shakher C, Nirala A K. Measurement of temperature using speckle shearing interferometry. *Appl Opt*, 1994, 33(11):2125~2127

7 姜文汉,王春鸿,凌宁,等. 61单元自适应光学系统. 量子电子学报,1998,15(2):193~199  
Jiang W H, Wang C H, Ling N, et al. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2):193~199

8 Koochesfahani M M, Dimotakis P E. Laser-Induced fluorescence measurements of mixed fluid concentration in a liquid plane shear layer. *AIAA Journal*, 1985, 23(11):1700~1707

9 饶学军,凌宁,王成,等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用. 光学学报,2002,22(4):491~492  
Rao X J, Ling N, Wang C, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4):491~492

10 McMackin L, Hugo R J, Bishop K P, et al. High speed optical tomography system for quantitative measurement and visualization of dynamic features in a round jet. *Exp Fluids*, 1999, 26(3):249~256

## Tomographic Reconstruction of Refractive Index Field Based on Hartmann Wavefront Sensing

Dai Yun<sup>1,2</sup>, Zhang Yudong<sup>1</sup>, Li Ende<sup>1</sup>, Wang Haiying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics & Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209

<sup>2</sup> Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-12-02

**Abstract** After a systematic description of the principle of tomographic reconstruction system based on Hartmann wavefront sensing, the tomographic reconstruction of circularly symmetric refractive index field is conducted as a static test. The projection data of field is obtained by Hartmann sensor, the reconstruction algorithm is algebraic reconstruction technique and a good reconstruction result is obtained.

**Keywords** Information optics; Tomography; Hartmann; Reconstruction



**Dai Yun** was born in Sichuan province, China 1976. He received his B. S. degree in 1999 and his master degree in 2002 in mechanics and electronics engineering from Xi'an University of Technology. Now he is a doctoral student at Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Science. His research focuses on optical computerized tomography, image processing and wave-front sensing.