

文章编号: 1001-3806(2007)02-0153-03

包含遮挡物的三维流场莫尔层析重建

宋 斌, 张 斌, 贺安之*

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了研究复杂流场环境下的包含遮挡物的非完全数据层析重建问题, 从莫尔层析的基本理论出发, 提出了一种将包含先验知识的属性矩阵融入迭代过程的全新的基于级数展开类的莫尔层析迭代算法。在此基础上, 通过数值模拟, 重建了包含遮挡物的三峰高斯分布的温度场, 取得了理想的重建结果, 并在相同条件下与层析变换类算法中滤波反投影算法进行了对比。结果表明, 将先验知识以属性矩阵的形式融入迭代过程后, 新算法与滤波反投影算法相比, 能有效地处理包含遮挡物的非完全数据重建问题, 为莫尔层析应用于实际测量奠定基础。

关键词: 信息光学; 莫尔层析; 重建算法; 非完全数据

中图分类号: O438 文献标识码: A

Reconstruction of three-dimension flow field by Moiré deflectometry with opaque objects

SONG Yang, ZHANG Bin, HE Anzhi

(Department of Information Physics & Engineering Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract For the propose of incomplete data reconstruction caused by opaque objects in a complex flow field, a novel iterative algorithm based on series expansion methods by Moiré tomography is developed from the essence of Moiré deflection. The property matrix of a priori knowledge is introduced into the iterative process. The algorithm is studied by using it to reconstruct three-hump simulated temperature fields with opaque objects, so an ideal reconstruction results are achieved. Results are also compared with results from the traditional filtered back-projection algorithm under same conditions. Results show that having been combined with the property matrix of a priori information, new algorithm is more efficient to handle incomplete data reconstructive problems than the filtered back-projection algorithm. So the foundation of taking Moiré tomography into practice is established.

Key words information optics; Moiré tomography; reconstruction algorithm; incomplete data

引 言

莫尔层析技术是由对待测相位场多方向投影所得的莫尔条纹偏移数据来重建待测场物理量分布的技术。它具有光路结构简单、抗干扰能力强等特点, 适合于恶劣条件下对大动态范围的复杂流场的测量, 如风洞中含激波的密度场^[1], 火箭尾焰产生的温度场^[2,3]等。

利用莫尔偏折重建相位场分布最早由 KAFRI 提出使用逆 Abel 变换对具有轴对称分布的相位场进行重建^[4,5], STRICKER 则直接使用莫尔层析的逆 Radon 变换公式对非对称温度场进行重建^[6], 而 FARIS 等则从相位层析的滤波反投影算法 (filtered back-projection, FBP) 出发, 导出了基于偏折层析的滤波反投影算法^[7]。以上的方法均属于变换类算法。另一类算法

是级数展开类算法, YAN 等提出了将莫尔层析的投影数据进行积分转换后再进行代数迭代重建的算法^[8]。在满足采样定理所要求的采样数下, 变换类算法, 尤其是滤波反投影算法具有极高的重建精度和重建速度, 但对非完全数据下的层析问题, 级数展开类算法显示了其优异的融合先验知识于迭代过程中的能力。但现有的上述转换投影的代数迭代算法抗干扰能力较弱, 莫尔层析投影上的噪声经过投影转换后会被放大 (相关研究本课题组另文描述), 迭代过程受噪声影响而极不稳定, 很容易发散。作者的工作就是从莫尔层析的基本理论出发, 提出一种新的级数展开类的莫尔层析算法, 将属性矩阵融入到迭代过程中, 以处理包含遮挡物的非完全数据投影下的层析重建问题。

1 算法描述

1.1 代数重建描述

设 $n(y, z)$ 为待测相位场的折射率分布, 在折射率场起伏较小, 无突变的情况下可以假设射线沿直线传

作者简介: 宋 斌 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事光学计算层析重建算法的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ha@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2005-12-15 收到修改稿日期: 2006-01-12

播,沿射线路径上的偏折角分布为^[9]:

$$\varphi(y', \theta) = \int_{-\phi}^{\phi} \frac{1}{n(y, z)} \frac{\partial n(y, z)}{\partial y'} dz' \quad (1)$$

因此, $\frac{1}{n(y, z)} \frac{\partial n(y, z)}{\partial y'} dz'$ 看作某一射线沿其路径在某一微小距离 dz' 内偏折角的微小增量,则射线的偏折角则可表现为这些微小增量的累加。将待测相位场平面划分为 $N = W \times H$ 个足够小的相等网格,则第 i 个网格内的折射率为 n_i , 第 j 条射线在第 i 个网格内的长度为 A_{ij} , 见图 1。如果有 l 个投影方向, 每个方向上采样 k

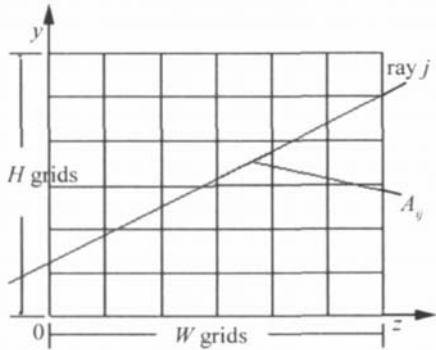


Fig 1 The essence of algebraic reconstruction

条射线, 有 $M = l \times k$, 则 (1) 式可重新写为:

$$\sum_{i=0}^{N-1} A_{ij} \frac{1}{n_i} \left(\frac{\partial n}{\partial y'} \right) \Big|_i = \varphi_j \quad (j = 0 \dots, M - 1) \quad (2)$$

为进行代数迭代, 需将偏微分项 $(\partial n / \partial y') \Big|_i$ 化为数值形式。如图 2 所示, 以网格 i 的中心点 C 为圆心做半

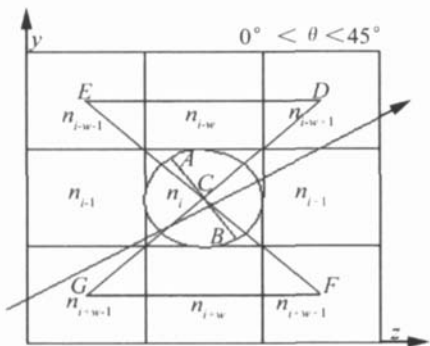


Fig 2 The method of numerical differentiation

径为 r 的内切圆, 经过中心点 C 对经过该网格的射线做垂线交底面圆于 A, B 两点, 则 $(\partial n / \partial y') \Big|_i$ 可以表示为 $(\partial n / \partial y') \Big|_i = (n_A - n_B) / 2r$, 考虑网格 i 周围的 8 个相邻网格, 图 2 示例在投影方向大于 0° 、小于 45° 的情况下, 用 C, D, E 3 点组成的平面计算 A 在该平面上的值, 用 C, F, G 组成的平面计算 B 点的值, 另外再用与网格 i 垂直以及水平方向上相邻的 4 个网格按此过程再次计算 A, B 两点的值, 综合这两种方法所得 A, B 两点的值取平均, 可得 $(\partial n / \partial y') \Big|_i$ 的数值形式。

如果待测场的折射率变化较小, 则 (2) 式中 $1/n \approx 1/n_0$, n_0 为参考折射率, 有:

$$\sum_{i=0}^{N-1} A_{ij} \left(\frac{\partial n}{\partial y'} \right) \Big|_i = n_0 \varphi_j \quad (j = 0 \dots, M - 1) \quad (3)$$

将 $(\partial n / \partial y') \Big|_i$ 的数值形式代入 (3) 式, 并重新组合 (3) 式, 改对 A_{ij} 累加为对 n_i 的累加, 这样可以将 (3) 式写为矩阵形式:

$$Bn = h - q \quad (4)$$

式中, B 为一个 $M \times N$ 维矩阵, n 为 N 维向量, 表示网格区域内的折射率, q 为 M 维向量, 称为边缘修正向量, 主要用于 (3) 式中由对 A_{ij} 累加改为对 n_i 的累加后平衡方程, h 也为 M 维向量, 对应于各采样射线的偏折角。这样莫尔层析问题已经通过 (4) 式转为求解线性方程组的问题。

1.2 含遮挡物的代数迭代重建

非完全数据投影下的层析重建问题始终是层析中的难点问题, 造成该问题的根本原因是不能获取满足采样定理所要求的投影数据, 其具体表现在两个方面: 投影角度的缺失和每个投影方向上采样数的不足。解决这些非完全数据重建的问题的核心是如何将先验知识融入重建过程中以弥补采样数不足的影响, 在这方面已经有很多文献论述^[10-12]。作者针对的则是由于遮挡物的存在造成各投影方向上采样数的不足的非完全数据层析重建问题, 在重建过程中, 采用属性矩阵 R 结合先验知识来约束迭代过程以弥补采样缺失的影响。先验知识包括: 折射率非负, 遮挡物的尺寸, 几何形状, 空间位置等信息。 R 实际上是与网格同大小的长度为 N 的向量, 如下式所示:

$$n_i = \begin{cases} R_s & (i \in S) \\ n_b & (i \notin S) \end{cases} \quad (5)$$

式中, S 表示需要由先验知识约束的区域。基本的代数迭代步骤如下: (1) 计算矩阵 B , 向量 h 以及边缘修正向量 q (2) 对向量 n 给以合适的初始值 $n^{(0)}$, 一般等于环境折射率 n_0 ; (3) $n^{(0,0)} = n^{(0)}$; (4) $n_i^{(k,j+1)} =$

$$n_i^{(k,j)} + \omega \frac{h_j - q_j - \sum_{i=0}^{N-1} B_{ij} n_i^{k,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} (B_{ij})^2} B_{ij}, \quad 0 \leq i \leq N - 1; \quad 0 \leq j \leq$$

$M - 1$ (5) 用 (5) 式对第 4 步迭代结果进行修正; (6) $n^{(k+1,0)} = n^{(k,M-1)}$, 其中 ω 为松弛因子, $\omega \in (0, 2)$; (7) 重复进行第 4 步至第 6 步, 直到满足预设的迭代次数或者两次迭代 n 的距离小于预设值。

2 模拟实验

2.1 实验装置

模拟实验装置如图 3 所示, He-Ne 激光器输出波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的激光扩束后经过被测场, 依次投影到光栅 G_1 和 G_2 上, 再经过小孔滤波后投影到屏 S 上, 其中光栅常数 $a = 0.005 \text{cm}$, 光栅间距 $\Delta = 3.22 \text{cm}$, 两光

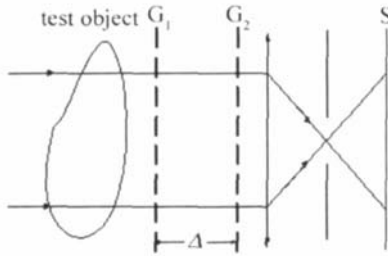


Fig 3 The experiment setup

栅间夹角 $\theta = 0.329^\circ$, 莫尔条纹宽度 $D_d = a / [2 \sin(\theta/2)]$, 为 0.87 cm , 莫尔条纹偏移量 M_d 与对应的偏折角 φ 的关系为: $\varphi = (M_d a) / (D_d \Delta)$ 。温度 t 与折射率 n 间的关系可由 G-D (Gladstone-Dale)^[9] 公式确定。

2.2 数值模拟

模拟实验模拟了具有高斯分布三峰温度场, 在每个高斯分布的中心均有一个截面积为 $0.4 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 的遮挡物, 三峰分布如下式所描述:

$$f(z, y) = \begin{cases} 100 \exp\{-[(z-16)^2 + (y-15)^2]/40\} + \\ 200 \exp\{-[(z-31)^2 + (y-23)^2]/40\} + \\ 300 \exp\{-[(z-21)^2 + (y-33)^2]/40\}, & (6) \\ (0 < z < 49, 0 < y < 49) \\ 0 & \text{outside the region} \end{cases}$$

设定网格数为 50×50 区域实际长度为 $6.5 \text{ cm} \times 6.5 \text{ cm}$ 。投影方向从 0° 到 177° , 每隔 3° 进行采样共 60 个方向。每方向采样数为 150, 但在对应遮挡物位置有缺失。进行代数重建时, 松弛因子取 0.25 迭代次数为 600 次。为了与新方法对比, 采用了在层析重建中应用最广泛的 FBP^[7] 做比较。图 4 图 5 图 6 分别

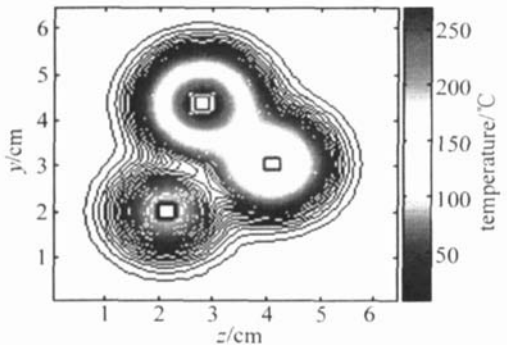


Fig 4 The three-hump temperature field with opaque objects

为原场分布、FBP 重建结果和新算法重建结果 (横坐标与纵坐标单位为网格数, 中心方块区域为遮挡物)。

采用均方根误差 (root mean-square error RMSE), 平均绝对误差 (mean absolute error MAE), 峰值误差 (peak value error PVE) 来评价重建效果, 3 种指标如表 1 所示。

Table 1 Reconstruction errors

	N_{RMSE}	N_{MAE}	N_{PVE}
FBP	0.00319	0.0683	0.725
new algorithm	0.00186	0.0296	0.286

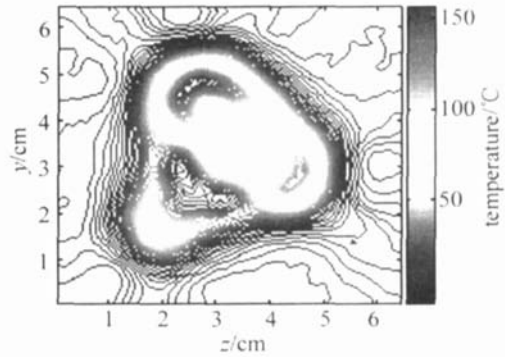


Fig. 5 FBP reconstruction with 60 directions

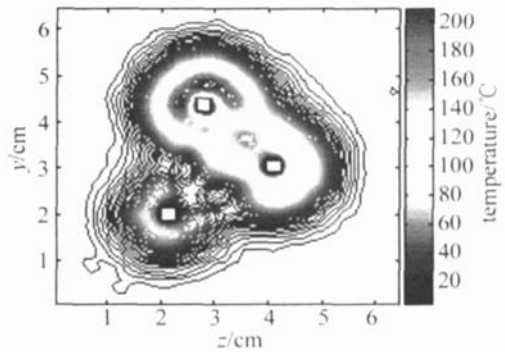


Fig. 6 New algorithm with 60 directions

其中 N_{RMSE} 表示重建场与原场逼近程度, N_{MAE} 表示重建场的光滑程度, 而 N_{PVE} 则表示重建场与原场相比的峰值误差。可见在包含遮挡物的情况下, 滤波反投影算法重建结果已完全不能反映原场分布, 而新的莫尔代数迭代算法由于在每一步均可以将先验知识通过属性矩阵的方式融入迭代过程, 重建场基本反映了原场的总体形状。

3 结论

莫尔层析技术来源于莫尔偏折理论, 其优点在于适用于大动态范围下的恶劣测试环境中的光学层析重建。从莫尔偏折原理的本质出发, 提出了一种新的莫尔层析代数迭代重建算法, 并在迭代过程中与属性矩阵相结合对由遮挡物造成的每个投影方向上采样不足的非完全数据投影下的层析重建进行研究。结果表明, 新算法与经典的滤波反投影算法相比, 由于其在迭代过程具有的不断融合先验知识的能力, 能够较好地处理非完全数据投影下的重建问题。因此, 作者提出的新算法为在实际光学层析重建问题中广泛存在的、为测量具有大动态范围、环境恶劣和被测场中存在遮挡物等问题的解决提供的依据, 为将莫尔层析应用于实际测量奠定基础。

参考文献

[1] STRICKER J. Axisymmetric density field measurements by Moiré deflectometry [J]. Appl Opt 1983 21(12): 1767~1769

3 结 论

提出的扁椭球模型代替通常所用的球模型来研究红细胞的光散射,以修正的 Rayleigh-Debye-Gans 近似理论为基础,引入扁椭球的体极化率,得到了扁椭球的散射光公式,并引用计算机软件对其进行数值模拟,研究了各种不同的情况下的散射光分布。理论研究结果表明:(1)扁模型在近似到球体问题时与修正的 Rayleigh-Debye-Gans 近似理论时完全一致;(2)红细胞在通过光敏区时的位置取向将对散射光产生较大的影响;(3)对于不同的形体因子的红细胞模型,前向散射完全符合米氏效应;后向及侧向散射光也有明显的变化,随着形体因子的增加,散射光极小值位置逐渐增多,并向小角度偏移;(4)对于不同折射率的红细胞模型,相同形体散射光分布基本不变,强度将随着折射率的增加非线性增长。

扁椭球模型更加反映了红细胞的实际情况,能得到更精确的测量结果;通过选择不同的大小的形体因子可以很好地对病变的变形红细胞进行区分,同时也可以应用于对细胞的变形性研究上。可以较好地应用于现代医学检验仪器,提高检验精度,进而提高诊断的正确性。

参 考 文 献

- [1] CRAM L S, MARTIN J C, STEINKAMP J A *et al* New flow cytometric capabilities at the national flow cytometry resource [J]. *Proc IEEE* 1992, 80(6): 912~ 917.
- [2] SLOOT P M A, FIGDOR C G. Elastic light scattering from nucleated blood cells rapid numerical analysis [J]. *Appl Opt* 1986, 25(9): 3559~ 3565.
- [3] GAO Sh M, LAN X F, LIU Y *et al* A nalysis of A_r^r laser induced erythrocyte fluorescencespectra with various wavelengths [J]. *Laser Technology* 2004, 28(3): 315~ 318(in Chinese).
- [4] YANG Y, ZHANG Zh X, YANG X H *et al* Blood cell counting and classification by nonflowing laser light scattering method [J]. *Journal of Biomedical Optics* 2004, 9(5): 995~ 1001.
- [5] HE J P, KARLSSON A, SWARTING J *et al* Light scattering by multiple red blood cells [J]. *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, 2004, 21(10): 1953~ 1961.
- [6] BORDI F, CAMETTIC, di BIASIO A *et al* Quasielastic light scattering from large anisotropic particles application to the red blood cells [J]. *Bioelectrochemistry* 2000, 52(2): 213~ 221.
- [7] LOPATION V V, PRICZHEV A V. Multiple light scattering by suspensions of erythrocytes in geometrical optics approximation [J]. *Proc SPIE* 2002, 4749: 267~ 274.
- [8] TSNOPOULOS S V, SELLOUNTOS E J, POLYZOS D *et al* Light scattering by aggregated red blood cells [J]. *Appl Opt* 2002, 41(7): 1408~ 1417.
- [9] SEUNKE J M, SHEPHERD A P. Comparison of Mie theory and light scattering of red blood cells [J]. *Appl Opt* 1988, 19(1): 4027~ 4033.
- [10] SHIMIZU K. Modification of the Rayleigh-Debye approximation [J]. *JOSA* 1983, 73(4): 504~ 507.
- [11] WANG Y W, HE A Zh, LU X L. Probability characterization method of arbitrary particles distribution and its measurement [J]. *Acta Optica Sinica* 2002, 22(3): 363~ 367(in Chinese).
- [12] WANG Y W, WU D J. Dynamical characteristics of the shape influence factor in scattering field and improvement of perturbation equation [J]. *Acta Optica Sinica* 2003, 23(10): 1261~ 1265(in Chinese).
- [13] ЯИХАДЯЙ И Д, ЛАНДАУ Л Д, М КХА ИФОР ИХ Л ИС Ц ИЗ Е. Electrodynamics of continuous medium [M]. Beijing People's Education Press 1978, 29~ 60(in Chinese).
- [14] WANG N N. Application of laser measuring technology in particle size [M]. Beijing Atomic Energy Press 2000, 138~ 140(in Chinese).
- (上接第 155 页)
- [2] YAN D P, LIU F, WANG Zh D *et al* Real time visualization and quantitative measurement of rocket exhausted plumes field [J]. *Laser Technology* 1996, 20(6): 332~ 334(in Chinese).
- [3] GAN X M, YOU H H, WANG Zh D *et al* Display and quantitative measurement of simulated exhaust flow field by Moiré deflectometry [J]. *Laser Technology* 1999, 23(2): 65~ 67(in Chinese).
- [4] KAFRIO. Moiré deflectometry: a ray deflection approach to optical testing [J]. *Opt Engng* 1985, 24(6): 944~ 960.
- [5] POSNER J D, DUNN-RANKIN D. Temperature field measurements of small nonpremixed flames with use of an Abel inversion of holographic interferograms [J]. *Appl Opt* 2003, 42(6): 952~ 959.
- [6] STRICKER J. Analysis of 3-D phase objects by Moiré deflectometry [J]. *Appl Opt* 1984, 23(20): 3657~ 3659.
- [7] FARBS G W, BYER R L. Three-dimensional beam-deflection optical tomography of a supersonic jet [J]. *Appl Opt* 1988, 27(24): 5202~ 5212.
- [8] YAN D P, LIU F, WANG Zh D *et al* Moiré tomography by ART [J]. *SPIE* 1996, 2861: 146~ 150.
- [9] ZHU D Zh. Laser metrology for thermal physics [M]. Beijing Science Press 1990, 4~ 12(in Chinese).
- [10] YAO H B, HE A Zh. Improvement of the reconstruction algorithm of optical computerized tomography [J]. *Acta Optica Sinica* 2004, 24(2): 158~ 161(in Chinese).
- [11] YAO H B, HE A Zh, WU Y Ch *et al* Three-dimensional tomography of incomplete data with fusion of virtual and real experiments [J]. *Acta Optica Sinica* 2005, 25(4): 479~ 484(in Chinese).
- [12] WAN X, HE X D, GAO Y Q. A novel limited-view tomography algorithm based on maximum entropy and its application [J]. *Acta Optica Sinica* 2003, 23(12): 1433~ 1438(in Chinese).