

文章编号: 0258-7025(2006)12-1665-06

光偏折层析重建流场中的两阶段降噪技术

张 斌, 贺安之, 宋 旻

(南京理工大学信息物理与工程系, 江苏 南京 210014)

摘要 光学层析技术中, 包含在投影信息中的噪声会严重影响重建精度。针对偏折层析的关键环节, 提出分两阶段对噪声进行抑制的方法。其一是在数据提取阶段使用小波分析技术对偏移量进行降噪, 其二是重建时使用偏折角平均修正算法抑制噪声对迭代计算的影响。模拟实验中使用莫尔层析重建技术对三峰温度场进行了重建, 结果显示降噪处理能够明显改善噪声对重建造成的不良影响, 对误差曲线的分析表明, 该处理使得 100 次迭代后误差的降幅高达 45%。结合 8 邻域求导算法和降噪处理技术, 对小型防风喷焰进行实际测量, 证实了莫尔偏折层析技术在流场测量领域的实用价值。

关键词 信息光学; 流场重建; 莫尔层析; 降噪

中图分类号 O 438 **文献标识码** A

Two-Stage Denoise Technique for Deflectometric Tomographic Reconstruction of Flow Field

ZHANG Bin, HE An-zhi, SONG Yang

(Department of Information Physics and Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract Projection data obtained through optical techniques for tomographic measurement are often with noise. The reconstruction accuracy is deteriorated by the Gauss- or Poisson-distributed noise. Corresponding to the major steps of tomographic technique, a two-stage denoise technique has been developed. The deflectometric data are denoised by wavelet-based procedure after projection data reduction. Deflection-angle averaging revision algorithm is applied to suppress the noise in iteration. The Moire tomographic reconstruction technique with eight-neighbor derivative algorithm and denoise method is tested using numerically generated data from a known temperature distribution and noise source. The results show that the denoise processing is able to improve the reconstruction accuracy significantly, which reduces the reconstruction errors of 45%. The temperature field of butane flame is then measured by the Moire tomographic technique and the experimental reconstruction is compared with the thermocouple temperature measurement.

Key words information optics; flow field reconstruction; Moire tomography; denoise

1 引 言

光学计算层析(OCT)技术因其可以实现非接触测量、定量计算等特点已经成为流场测试领域的有力工具。其关键技术在于采样、投影数据提取和重建算法三个环节。根据采样数据的不同, 可以将其分为两类: 一类为相位层析, 另一类为偏折层析。

其中, 莫尔偏折层析具有光学装置简单、对光源要求不高、动态范围大等优点, 非常适合于复杂流场的测量^[1,2]。在采样过程中, 由于成像器件、光学系统等原因不可避免地会引入噪声, 它们满足高斯分布或泊松分布, 通常被视为加性噪声来处理^[3]。投影数据提取和重建计算时如果不对噪声进行处理, 噪声

收稿日期: 2006-04-12; **收到修改稿日期:** 2006-05-31

作者简介: 张 斌(1978—), 男, 山东淄博人, 南京理工大学光学工程专业博士研究生, 主要从事复杂流场的光学层析研究。E-mail: zb-sh@163.com

导师简介: 贺安之(1938—), 男, 四川遂宁人, 南京理工大学教授, 博士生导师, 主要从事激光与现代光学的教学与研究。E-mail: haz@mail.njust.edu.cn

就会严重影响重建质量,甚至使层析根本无法得到有效的重建结果。莫尔技术由于其自身的原理和特点,条纹图往往更易受噪声影响。姚卫^[4,5]和王鸣等^[6,7]分别将相位展开技术应用干涉层析和莫尔层析的投影数据提取,这种方法在使用傅里叶变换提取+1级频率的同时自然地进行了去噪声处理,但傅里叶变换在时、频域转换中的局限性决定了其很难高精度地处理复杂信号。由于流场测量时获得的经常是包含遮挡物和有限角采样的非完全数据,级数展开类算法,尤其是代数重建技术^[8]在层析重建中更具实用价值。国外学者对干涉层析的代数重建技术进行了大量对比研究^[9~12],其中就包括改进算法以降低噪声对重建计算的影响,但结合降噪技术的偏折层析代数重建技术尚少见报道。

本文研究了使用含噪声的非完全偏折投影数据重建流场的莫尔层析技术。在前期工作的基础上^[13,14],我们介绍更精确的基于8邻域求导模型的偏折角修正迭代算法。在对噪声的处理技术上,我们提出了在层析的两个阶段分别对其进行抑制的方法,其一是使用小波分析技术对跟踪条纹得到的偏移量直接进行消噪;其二是引用干涉层析中的平均代数重建思想——使用通过同一网格的多条射线平均值在迭代过程中降低噪声的影响,并给出了相应于莫尔层析的偏折角平均修正迭代公式。结合这两种方法,对模拟和真实温度场进行了重建,并分析了重建效果和误差。

2 基于8邻域求导算法的偏折角修正重建算法

如图1所示的坐标系中,将待测场离散化为 k 个网格,在小角度偏折的情况下,光线穿过待测场平面后在 y' 方向的偏折角 φ 可以写成

$$\sum_{i=0}^{k-1} A_{ij} \left(\frac{1}{n_0} \frac{\partial n_i}{\partial y'} \right) = \varphi_j, \quad j = 0, 1, \dots, l \quad (1)$$

其中 n_i 和 n_0 分别为待测场和环境的折射率, A_{ij} 为第 j 条光线通过第 i 个网格的长度。令 p 为投影方向数, m 为每个投影方向上的采样数,则总采样数 $l = (m-1) \times p$ 。

为了更精确地计算 $\partial n_i / \partial y'$ 项,构建如图1中的两个模型。使用图1(a)中的模型,可以得到由 $n_{i-w}, n_{i-1}, n_{i+w}, n_{i+1}$ 和 n_i 表达的偏导数计算公式;在图1(b)中使用同样的方法可以将偏导数由 $n_{i-w-1}, n_{i-w+1}, n_{i+w-1}, n_{i+w+1}$ 和 n_i 表达,将这两种表达求平

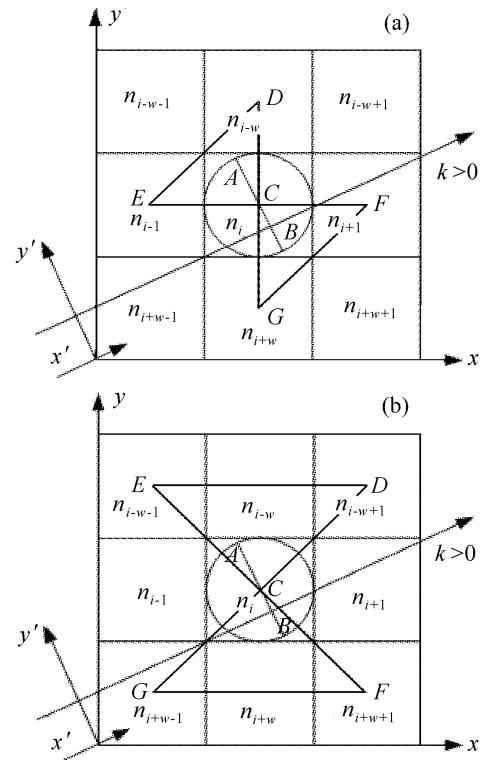


图1 两种偏导数计算模型

Fig. 1 Two models for eight-neighbor derivative algorithm

均,便可得到由 n_i 的8个邻域折射率表示的偏导数计算公式。经过求和、拆分和移项等处理技巧,偏折公式最终写为

$$\begin{cases} Cn = h - q + Dn \\ Dn = Cn - h + q \end{cases}, \quad (2)$$

其中 C 和 D 为两个对等的 $l \times k$ 维向量, n 为表征折射率分布的 k 维向量, q 和 h 均为 l 维向量,分别表示迭代过程中的边缘修正量和各采样的偏折角。应用代数重建技术,便可得到最终的迭代计算公式^[13]。

3 莫尔层析重建中的降噪技术

3.1 使用小波技术对提取的投影数据进行降噪

对采集的不同方向的莫尔偏折图进行图像处理和条纹跟踪后得到条纹偏移量,噪声包含在其中。含噪的离散一维信号可以表示为

$$f(t) = o(t) + e(t), \quad t = 0, 1, \dots, l \quad (3)$$

其中 $f(t)$ 为含噪信号, $o(t)$ 为原始信号, $e(t)$ 为噪声信号。对 $f(t)$ 作小波变换得到

$$Wf(u, v) = 2^{-u/2} \sum_{t=0}^l f(t) \psi(2^{-u}t - v), \quad (4)$$

式中 $Wf(u, v)$ 即为小波系数。借助双尺度方程,可以得到小波变换的递归实现方法^[15]

$$Sf(u+1, v) = Sf(u, v) * h(u, v), \quad (5)$$

$$Wf(u+1, v) = Sf(u, v) * g(u, v), \quad (6)$$

式中 h 和 g 分别为对应于尺度函数 φ 和小波函数 ψ 的低通和高通滤波器, $Sf(0, v)$ 为原始信号 $f(v)$, $Sf(u, v)$ 为尺度系数, “*” 代表卷积。相应地, 小波变换重构公式为

$$Sf(u-1, v) = Sf(u, v) * \tilde{h}(u, v) + Wf(u, v) * \tilde{g}(u, v), \quad (7)$$

式中 \tilde{h} 和 \tilde{g} 分别为与 h 和 g 对应的对偶滤波器。将小波系数 $Wf(u, v)$ 简记为 $\omega f_{u,v}$, 使用小波阈值去噪方法对提取的偏移数据进行降噪的步骤为:

1) 选择合适的小波并确定分解层次, 对偏移量做小波变换, 得到一组小波系数 $\omega f_{u,v}$ 。

2) 对各级小波系数进行阈值处理, 得出估计小波系数 $\hat{\omega} f_{u,v}$ 。

3) 利用 $\hat{\omega} f_{u,v}$ 进行小波重构, 得到估计偏移量 $\hat{f}(v)$, 即为降噪后的偏移量。

经过降噪处理的偏移数据便可代入层析迭代公

式进行重建计算。

3.2 使用偏折角平均修正算法在重建计算中抑噪

对重建算法的改进是抑制噪声影响的另一重要环节, Mishra 等^[10]通过对干涉层析的代数重建算法进行对比研究得出结论, 平均代数重建技术 (AVART) 和平均倍增代数重建技术 (AVMART) 对噪声的敏感度最低。平均代数重建技术是联合代数重建技术 (SART)^[16] 的一种改进形式, 它所采用的“平均”思想可以抑制噪声对重建的影响, 并在干涉层析中得到了应用研究^[12]。使用平均代数重建技术时, 不同视角的所有采样都要参与到对矢量 $n^{(s)}$ 的修正; 也就是说, 每次迭代时对所有经过网格 i 的采样进行计算, 求得相应于各射线的修正量, 再取它们的平均值对 $n_i^{(s)}$ 进行修正, 以此方法对所有网格值更新后, 完成一次迭代。将此思想与我们的莫尔层析重建算法相结合, 得到偏折角平均修正迭代公式

$$\begin{cases} n_i^{(s+1)} = n_i^{(s)} + \frac{1}{\gamma_i \gamma_i} \sum \omega \frac{(h_j - q_j + \sum_{i=0}^{k-1} D_{ij} n_i^{(s)}) - \sum_{i=0}^{k-1} C_{ij} n_i^{(s)}}{(\sum_{i=0}^{k-1} C_{ij})^2} C_{ij} \\ n_i^{(s+1)} = n_i^{(s)} + \frac{1}{\gamma_i \gamma_i} \sum \omega \frac{(q_j - h_j + \sum_{i=0}^{k-1} C_{ij} n_i^{(s)}) - \sum_{i=0}^{k-1} D_{ij} n_i^{(s)}}{(\sum_{i=0}^{k-1} D_{ij})^2} D_{ij} \end{cases}, \quad j = 0, 1, \dots, l \quad (8)$$

式中 γ_i 表示所有与网格 i 相交的射线总数, ω 为松弛因子, n_i 的上角标分别表示第 (s) 次和 $(s+1)$ 次迭代。平均修正的重建思想决定了迭代公式中并不需要较低的松弛因子, 在一定次数的迭代后, 重建计算必须停止, 实际计算时可以通过误差分析来决定最优的迭代次数。

平均倍增代数重建技术同样采用了“平均”思想, 即对经过单一网格 i 的所有光线进行考虑后再做出修正^[10,11]。由于光偏折生成条纹与光干涉生成条纹的原理不同, 光偏折产生的变形条纹位移在参考直条纹上下两侧均有分布, 即投影得到光线偏折角可以为正、负或零。在求取修正系数时, 采样偏折角与每一次迭代的数值积分偏折角的比值无法保证非负性, 因此重建计算也不能保证迭代的收敛性。模拟计算时发现, 所有的倍增代数重建类算法在偏折角修正迭代过程中均很快发散, 无法得到有效的重建分布。

4 实验与结果

4.1 模拟实验

我们采用满足高斯分布的三峰温度场 (如图 3 (a)) 进行重建, 温度分布为

$$T(x, y) = 150 \exp \left[-\frac{(x-8)^2 + (y-8)^2}{10} \right] + 200 \exp \left[-\frac{(x-20)^2 + (y-12)^2}{10} \right] + 250 \exp \left[-\frac{(x-10)^2 + (y-20)^2}{15} \right], \quad (9)$$

该温度场被离散化为 30×30 网格, 8 个非等间隔采样角分别为 $15^\circ, 42^\circ, 65^\circ, 80^\circ, 108^\circ, 130^\circ, 155^\circ$ 和 170° , 每个方向的实际像素数为 301, 采样数为 149。为了描述重建分布和真实分布的差异, 选用均方根误差 E_{nd} 和平均绝对误差 E_{ad} 这两个评价参数, 它们的定义分别为

$$E_{nd} = \frac{\|n_e(x_i, y_i) - n_r(x_i, y_i)\|}{\|n_e(x_i, y_i)\|}, \quad (10)$$

$$E_{ad} = \frac{\sum |T_e(x_i, y_i) - T_r(x_i, y_i)|}{k \cdot \max\{T_e(x_i, y_i)\}}, \quad (11)$$

式中 n_e 和 n_r 分别为真实场和重建场的折射率分布, T_e 和 T_r 分别代表真实温度分布和重建温度分布。用数值方法生成 8 个方向的偏折投影数据,如图 2 (a);图 2(b)为叠加了高斯白噪声的偏移数据。使用不同的重建方法对含噪采样数据进行计算,得到折射率分布后再由 G-D 公式求出温度分布。迭代时使用的松弛因子 $\omega = 0.5$, 迭代初值 $n^{(0)} = 1.000292015(T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的折射率平面), 迭代过程中加入了 $T_r(x_i, y_i) \geq 0$ 的限制条件, 每次迭代后没有对重建分布进行任何平滑操作。图 3(b)是直接使用含噪数据和偏折角修正迭代算法^[13]重建的结果(图 3 中各图的 x, y 坐标值表示重建区域对应的被划分网格数);采用 4 层的 Coiflet 小波对含噪采样进行降噪处理, 得到如图 2(c)的降噪偏移量, 再使用偏折角平均修正迭代算法(式(8))重建的结果如图 3(c)。图 4 显示了这两种方法的重建误差曲线对比, 其中图 4 中的“o”线表示使用含噪数据直接迭代生成的误差, “+”线为结合降噪处理的重建过程的误差。实验中发现这两种方法都在大约 110 次迭代后开始发散, 因此图 3 和图 4 给出的均为 100 次迭代后的结果。

可以看出, 图 3(c)中的三峰结构明显好于图 3

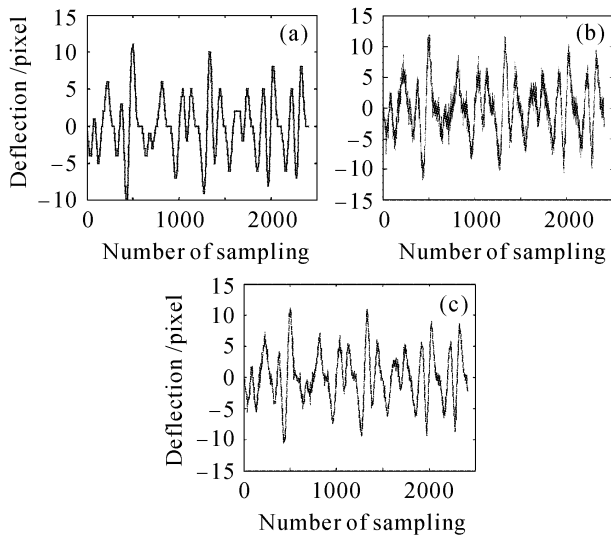


图 2 8 方向采样的偏移量

- (a) 不含噪声的采样; (b) 叠加噪声的采样;
- (c) 降噪后的采样

Fig. 2 Projection samplings of deflection in 8 view angles

- (a) original samplings; (b) samplings with noise;
- (c) denoise samplings

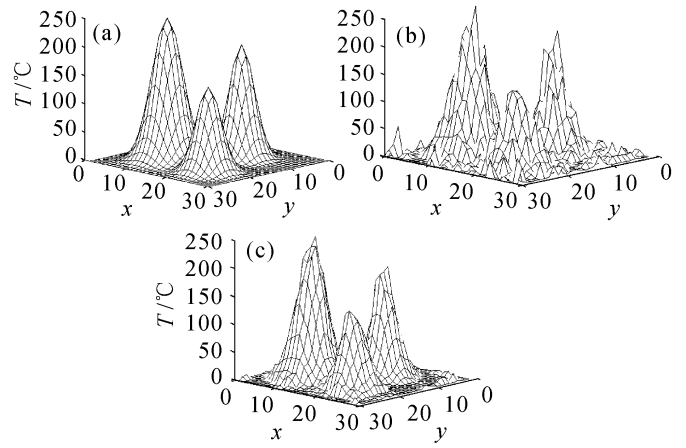


图 3 模拟实验与结果

- (a) 原场; (b) 使用含噪数据直接计算的重建结果;
- (c) 结合降噪处理的重建结果

Fig. 3 Numerical simulation for reconstruction

- (a) exact field; (b) reconstruction from the projection data with noise;
- (c) reconstruction with denoise technique

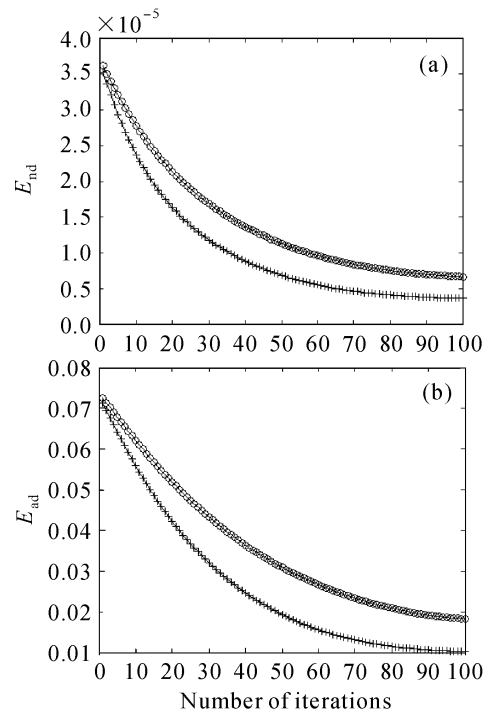


图 4 使用不同重建方法生成的误差曲线

- (a) 均方根误差曲线; (b) 平均绝对误差曲线

Fig. 4 Error curves by different reconstruction methods

- (a) E_{nd} curves; (b) E_{ad} curves

(b), 经过降噪处理后, 重建得到的网格表面更为光滑, 尖锐的毛刺大为减少。从定量的误差分析也可以发现, 结合降噪处理的重建误差始终低于直接迭代的重建误差, 迭代 100 次后, 不考虑误差的重建均方根误差和平均绝对误差分别为 6.67×10^{-6} 和 1.83%, 而进行降噪处理后, 这两项误差分别降到 3.66×10^{-6} 和 1.02%, 降幅高达 45%。可见, 我们

为偏折层析重建设计并采用的降噪技术是十分有效的。

4.2 温度场的实验测量

使用莫尔层析技术对小型防风喷焰进行了测量。实验中使用的是前期工作中设计制作的莫尔偏折仪^[13]，光源是功率为20 mW的半导体激光器，两光栅节距均为0.05 mm，两光栅间距为33 mm，CCD拍摄的偏折前后的莫尔条纹如图5所示。由于防风喷焰相对比较稳定，因此将其简化为轴对称温度场来处理。选取距喷口6 mm的平面作为重建截面，将条纹跟踪记录的偏折量减去条纹未变形时的初始偏移，即得到了温度场生成的含噪偏移量，如图6(a)。使用4层的 Coiflet 小波降噪技术对其进行处理，截

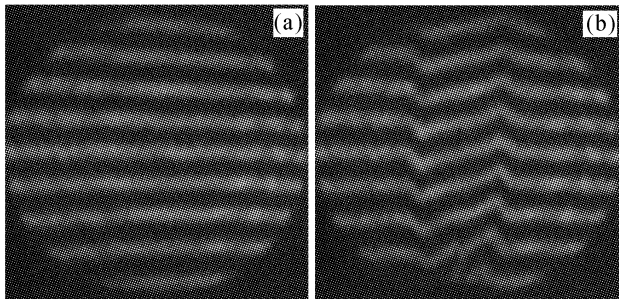


图5 温度场的莫尔条纹图

(a) 未变形条纹；(b) 变形莫尔条纹

Fig. 5 Moire deflectograms of temperature field

(a) undeformed pattern; (b) deflectogram

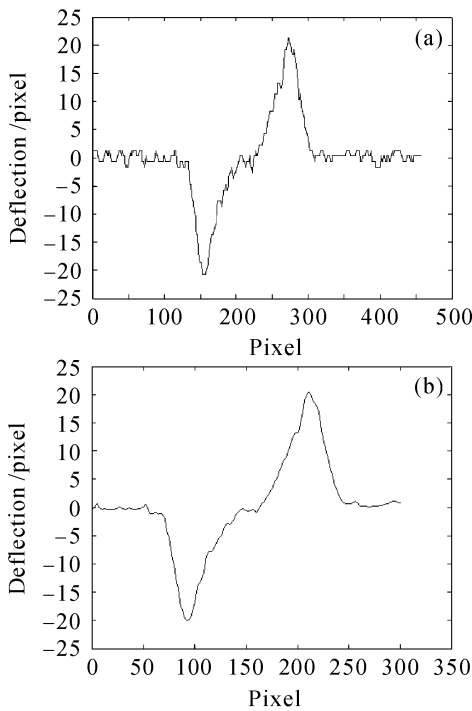


图6 重建截面的条纹偏移量

(a) 含噪偏移量；(b) 降噪后的偏移量

Fig. 6 Deflection in reconstructed section

(a) deflection with noise; (b) denoise deflection

取数据(301个像素)后得到了图6(b)中的偏移量用于重建。计算时划分 30×30 网格，使用等间隔的8个投影方向，每个方向的采样数为135，松弛因子为0.5，迭代初值是 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的折射率平面，使用式(8)迭代100次后的重建结果如图7，图7中的 x, y 值表示重建区域对应的被划分的网格数。

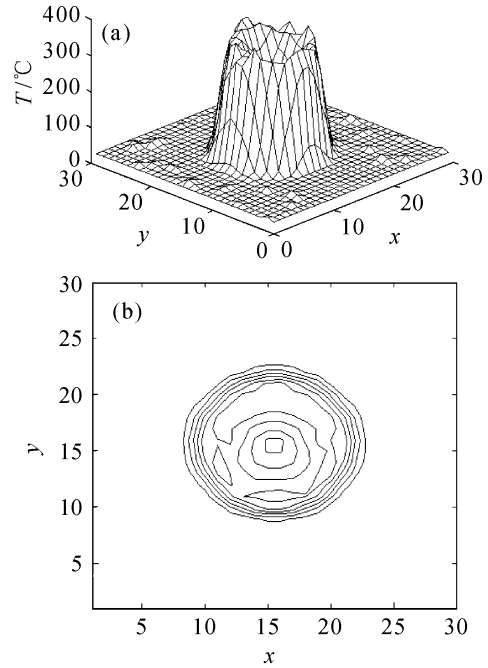


图7 重建的温度分布

(a) 截面温度分布；(b) 等温线图

Fig. 7 Reconstructed temperature distribution at the designated section

(a) 3D temperature field; (b) temperature contour map

由重建结果可知，等温线基本呈对称的同心圆分布，计算得到的高温周界温度大部分集中在 $320 \sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 之间，最高温度达到了 $354.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，焰心温度为 $186.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。使用热电偶直接测量该平面高温周界的两点温度值，分别为 $346\text{ }^\circ\text{C}$ ， $352\text{ }^\circ\text{C}$ ，符合我们对该区域的重建温度范围；测得焰心温度为 $199\text{ }^\circ\text{C}$ ，重建误差为 6.4% 。

5 结 论

以双模型平均值为基础的8邻域求导方法，使得偏导数及重建计算更为准确；针对层析技术的关键环节，使用小波分析技术在数据提取阶段对偏移量进行降噪，重建时使用偏折角平均修正算法抑制噪声对迭代计算的影响。小波变换优秀的时频特性决定了它比傅里叶变换更适宜处理复杂信号。在选择小波参数时，小波尺度越大，噪声和信号表现的不

同特性越明显,越有利于信噪分离;但另一方面,分解的次数越多,则失真越大,即重构误差越大。因此设置尺度时,必须兼顾二者。在对抗噪声能力最强的平均代数重建技术和平均倍增代数重建技术的研究中发现,由于沿光线积分并投影的偏折数据并非如同干涉层析的光程差投影数据一样全部非负,因而在做倍增修正时无法保证算法的收敛性。因此本文使用的偏折角平均修正迭代算法已是莫尔层析最优的抑噪代数重建算法。由此可见,两阶段抑噪处理有效地提高了莫尔层析的重建精度,并使其成为更加实用的流场测试技术。

参 考 文 献

- O. Kafri, I. Glatt. Moire deflectometry: a ray deflection approach to optical testing [J]. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6): 944~960
- J. Stricker. Analysis of 3-D phase objects by moire deflectometry [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20):3657~3659
- Donald L. Snyder, Carl W. Helstrom, Aaron D. Lanterman *et al.*. Compensation for readout noise in CCD images [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2):272~283
- Yao Wei, He Anzhi. Three-dimensional flow field tomography based on phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(11):1562~1566
姚卫,贺安之. 基于相位展开的三维流场干涉层析术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(11):1562~1566
- Yao Wei, Wu Donglou, He Anzhi. Real three-dimensional reconstruction of temperature field based on wave-front retrieval [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4):337~342
姚卫,吴东楼,贺安之. 基于波前恢复的温度场真实三维重建[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(4):337~342
- Ming Wang, Li Ma, Dacheng Li *et al.*. Subfringe integration method for automatic analysis of moire deflection tomography [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(10):2726~2733
- Zhong Jingang, Wang Ming, Li Dacheng. Fourier transform moire deflectometry for automatic measurement of gas temperature field [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3):275~280
钟金刚,王鸣,李达成. 傅里叶变换莫尔偏折术用于自动测量气体温度场[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3):275~280
- R. Gordon. A tutorial on ART [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1974, **NS-21**:78~93
- H. Sun, S. S. Cha. Computational tomographic reconstruction for limited ill-posed interferometric data [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1992, **17**:167~178
- Debasish Mishra, Jon P. Longtin, Raman P. Singh *et al.*. Performance evaluation of iterative tomography algorithms for incomplete projection data [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(7):1522~1532
- Dean Verhoeven. Multiplicative algebraic computed tomographic algorithms for the reconstruction of multidirectional interferometric data [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(2):410~419
- C. Soller, R. Wenskus, P. Middendorf *et al.*. Interferometric tomography for flow visualization of density fields in supersonic jets and convective flow [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14):2921~2932
- Zhang Bin, Song Yang, Song Yizhong *et al.*. Flow field moire tomography based on phase unwrapping and a new iterative reconstruction algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 531~536
张斌,宋阳,宋一中等. 基于相位展开和一种新的迭代重建算法的流场莫尔层析术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):531~536
- Song Yang, Zhang Bin, He Anzhi. A novel iterative algorithm for moiré tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 367~372
宋阳,张斌,贺安之. 一种新的叠栅层析迭代算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):367~372
- Xu Chen, Zhao Ruizhen, Gan Xiaobing. Wavelet Analysis • Application Algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2004. 104~106
徐晨,赵瑞珍,甘小冰. 小波分析•应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 104~106
- Anders H. Andersen. Tomography transform and inverse in geometrical optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(8):1385~1395