

doi:10.3788/gzxb20144309.0912004

应用隧道探索算法提取莫尔条纹偏移量

孙涛, 宋一中

(德州学院 物理与电子工程学院, 山东 德州 253000)

摘 要:为了精确提取莫尔条纹偏移量,提出了隧道探索算法,并将其应用于实际莫尔条纹分析.使用双光栅产生莫尔条纹,抓拍多方向投影.应用数字图像处理技术,追踪分析实验莫尔条纹.首先,追踪各条纹的极大值分布,根据条纹极大值分布挖掘条纹隧道,调整挖掘宽度,即像素宽度,既实现隧道贯通,又不干预相邻条纹.然后,二值化莫尔图,噪声滤波,滤除条纹隧道壁上的噪声毛刺,使隧道壁趋于光滑.最后,根据两侧隧道壁的布局,探索条纹隧道走向,提取隧道走向数据,获得条纹偏移量.并进一步转换为偏折角,即光学计算机层析投影.应用非线性自适应迭代重建算法对偏折角进行迭代重建.结果发现,最高重建截面温度是 492 °C,额定电热器表面温度大约 500 °C,重建截面恰恰在电热器上表面上方,所以重建结果是有效的.

关键词: 光学工程;光信息处理;光学层析;计算机层析;层析重建;莫尔条纹;条纹追踪;算法

中图分类号: O438; O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0912004-5

Extracting Moiré Fringe Deviation with Tunnel-exploring Algorithm

SUN Tao, SONG Yi-zhong

(Institute of Physics and Electronic Engineering, Dezhou University, Dezhou Shandong, 253000, China)

Abstract: In order to accurately extract out Moiré fringe deviations, the tunnel-exploring algorithm was proposed, and used to analyze Moiré patterns. The Moiré patterns were produced with double Ronchi gratings, and captured in many projecting directions. With the technology processing digital images, the experiment Moiré patterns were tracked and further analyzed with a series of analyzing techniques. This series of processing algorithms are called tunnel-exploring algorithm here. The tunnel-exploring algorithm includes tracking maximums of fringes, excavating fringe tunnels, binarizing Moiré patterns, filtering out noise, exploring fringe tunnels, extracting the track of tunnel extension, and so on. First, each of Moiré fringes is tracked based on its column pixels' maximums. According to the maximums' distributions, the fringes are excavated into tunnels. Each trenched width, viz. the width of pixels, is adjusted to make the tunnel link up, but not to interfere the adjacent fringes. Second, the Moiré patterns with excavated tunnels are binarized and filtered. The fringe tunnels are smoothed out by filtering out the noise on both sides of each tunnel. Last, the fringe tunnels are explored based on the distributions of both sides of each tunnel, and the track of each tunnel extension are extracted out, then the fringes' deviations are obtained. Therefore, by tunnel-exploring algorithm processing, the fringes' deviations were obtained. Then, they are used to reconstruct a section temperature distribution of the flow field using nonlinear auto-adjusting iterative reconstruction technique. As the result, the highest temperature reconstructed is 492 °C. The rated surface temperature of the heater is about 500 °C. The reconstructed section is just above the heater, so the reconstruction is considered reasonable.

Key words: Optical engineering; Optical data processing; Optical tomography; Computerized tomography; Tomography reconstruction; Moiré Fringes; Fringe detection; Algorithm

OCIS Codes: 120.2650; 120.6780; 120.4120; 000.3860; 120.2880

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11203006)和山东省自然科学基金(No. ZR2009AM021)资助

第一作者: 孙涛(1978-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光学相干测量. Email: taosunmaster@126.com

通讯作者: 宋一中(1971-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学工程、光学相干测量. Email: yizhongsong@126.com

收稿日期: 2014-02-20; **录用日期:** 2014-05-23

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

莫尔层析技术已成为测量和可视化流场的重要技术之一^[1-2],已被用来测量风洞中的激波与火焰的温度分布^[3-4].该技术实现通常分为三个技术环节:产生莫尔条纹、提取投影信息和重建流场^[5-6].通常用双光栅产生莫尔条纹^[7-8],在分析莫尔条纹,提取投影数据时,通常有两种方法:条纹探测法^[9-10]和傅里叶分析法^[11-12].条纹探测法是通过探测条纹的极值提取条纹偏移量,方法简单且直观^[9-10];傅里叶分析技术从莫尔条纹提取相移信息,方法相对较难,但能够同时分析获取全部条纹的相移信息,并且可以降低条纹局部缺失带来的不便^[11-12].值得注意的是,应用傅里叶分析技术处理莫尔条纹时,采用的是数字图像处理技术,那么莫尔条纹的傅里叶谱必然是混叠的^[13-14],滤波时必然会引入误差.为了降低频谱混叠导致的影响,应该缩小滤波器,但这将加深相移细节的丢失程度.

Servin *et al.*^[9]提出了一种智能莫尔条纹探测算法,即多点曲线拟合算法.使用一系列的离散点拟合莫尔条纹,拟合程度与点的密度密切相关,拟合运算量较大,这对于像素级的条纹偏移量而言,误差可能会覆盖信号.Canabal *et al.*^[10]应用微分改善莫尔条纹的对比度以提高条纹偏移量提取精度.但是综合光栅自成像莫尔条纹不能通过微分提高清晰度,因为这种条纹的强度分布近似是余弦的^[15-16].

莫尔条纹应用越来越广泛^[17-18],迫切需要可靠的条纹追踪算法^[5,19].本文开发了一种条纹追踪算法——隧道探索算法(the Tunnel-exploring Algorithm, TEA)并讨论了 TEA 算法及其应用方法.

1 实验

用双光栅产生莫尔条纹,用实验室自开发的可旋转投影系统投影采集,图 1 是莫尔条纹采集系统.将全部实验仪器、设备固定在一个长方形铝板上,该铝板可以绕中心轴自由旋转.实验系统在本文的相关工作中见文献[20].

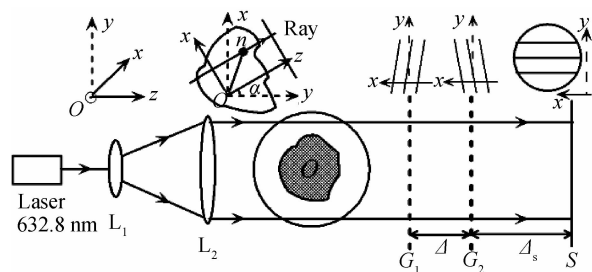


图 1 投影系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rotatable projection system
用两个电烙铁产生热流场,因激光扫描范围较小,

两个电烙铁发热头几乎靠到了一起,分别控制两个电烙铁工作电压以产生非均匀流场,电烙铁额定表面温度约 500 °C.电烙铁固定在图 1“O”点的实验台上,不随铝板转动,当铝板在 180°范围内转动时,可以采集到热流场各个方向的投影.

图 2 是准直激光束携带相位信息穿过双光栅后的衍射图($\alpha=0^\circ, 45^\circ$ 两个投影方向上),文献[5]中称莫尔条纹.图 2(a)是准直激光束未经热流场折射而直接到达 G_1 光栅前的莫尔条纹,称背景莫尔条纹,图 2(b)是受热流场扰动的莫尔条纹.从图 2(a)可见,背景莫尔条纹分布均匀,从 2(b)可见,受扰动后,莫尔条纹弯曲、畸变.这种条纹的畸变量就是需要提取的投影信息.

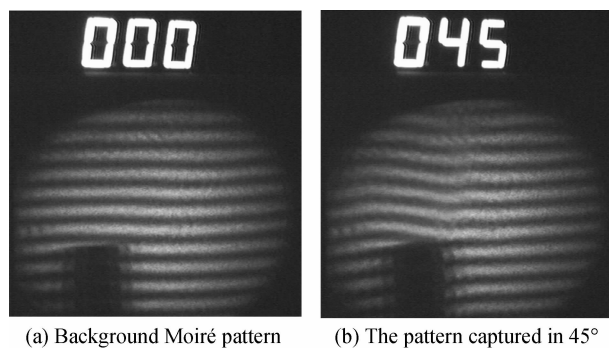


图 2 热流场莫尔条纹

Fig. 2 Moiré deflection patterns of the flow field

2 提取条纹偏移量

图 2 中实验抓拍的莫尔图分上、中、下三部分.上部仅包含一个三位数字,如“000”、“045”等,记录的是投影方向编码.中部是完整的莫尔条纹,而下部是被加热器遮挡的不完整莫尔条纹.本文只讨论中部完整莫尔条纹,为了讨论方便,截取中部核心区域 120×406 pixels 的条纹进行分析,如图 3.

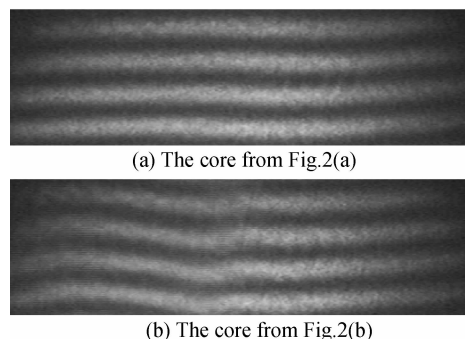


图 3 条纹核心区域

Fig. 3 Cores extracted from Figure 2 in size of 120×406 pixels

图 3(a)、(b)分别是图 2(a)、(b)截取的中部核心区条纹.如果直接使用传统的条纹追踪算法处理图 3 有很大困难,因为无论亮条纹,还是暗条纹强度分布非常不均匀.本文开发了一种新的条纹追踪算法 TEA

追踪这种条纹, TEA 包括: 极值追踪、隧道挖掘、图像二值化、噪声滤波、隧道探索、数据提取等具体算法。

图 4 是追踪亮条纹算法。首先, 测量条纹间距近似值(约 29), 初始化各条纹任一个极大值位置。第二步, 基于初始化的极大值位置, 分别向上、向下检索 4 个像素值(检索范围相当于 1/3 条纹间距), 找到 9 个像素中的最大值, 并将其位置标注“max”。

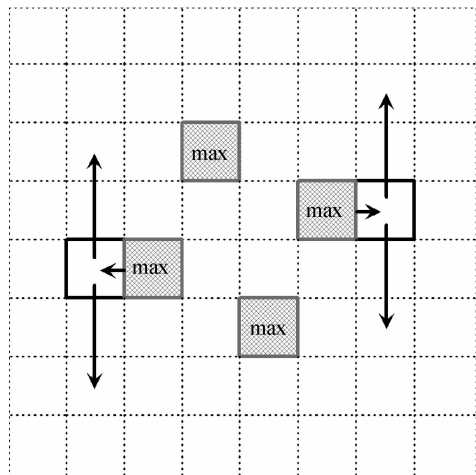


图 4 TEA 极值追踪算法
Fig. 4 Tracking maximums

第三步, 基于“max”位置, 初始化相邻列像素的极值位置。第四步, 同样检索方法, 确定相邻列像素的最大值。依次追踪下去, 直到标注到第一列和最后一列, 完成整个条纹极大值追踪。图 3(a) 第二条纹的追踪结果如图 5。

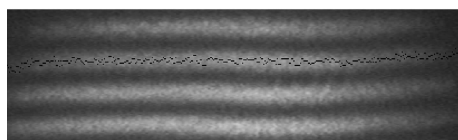


图 5 追踪极大值结果
Fig. 5 Tracking maximum results

由图 5 可见, 极值分布与条纹总体上是吻合的, 但由于图像噪声影响, 条纹的极值分布是随机离散, 不连续的。如果直接提取条纹极值作为条纹分布数据, 必然引进较大误差, 因为条纹偏移量是像素级的, 与图像噪声是同级的, 噪声很容易淹没条纹偏移信息, 所以必须降低噪声干扰。降噪算法包括: 隧道挖掘、图像二值化、噪声滤波。

图 6 条纹隧道挖掘算法是基于图 4 的条纹极值追踪结果。基于图 4 的“max”位置, 向上、向下各检索 2 个像素, 并置“255”, “max”也置“255”。图 7 给出了图 5 的挖掘处理结果。

由图 7 可见, 亮条纹是连续的。即经过条纹隧道挖掘运算, 亮条纹呈隧道连通状态, 为噪声滤波打下了基础。全部亮条纹经隧道挖掘后都变成连通隧道亮条纹, 其他像素全部置“0”, 这就是 TEA 二值化, 图 8 是图 7

的二值化结果。

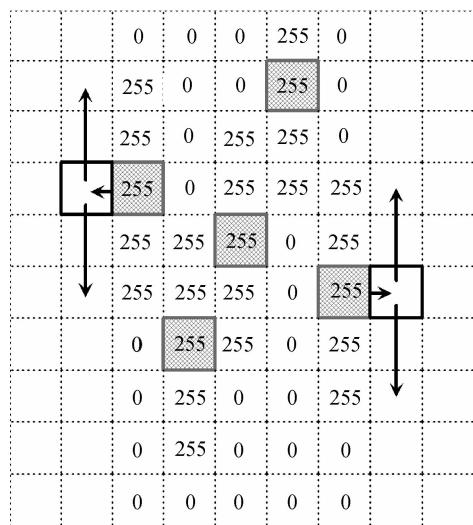


图 6 条纹隧道挖掘算法
Fig. 6 Excavating tunnel algorithm

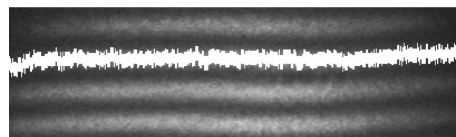


图 7 条纹隧道挖掘结果
Fig. 7 Excavating results

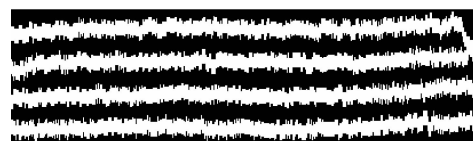


图 8 二值化结果
Fig. 8 Binarized results

由图 8 可见, 隧道边沿有许多毛刺噪声, 本文设计了降噪滤波器抑制这种噪声, 图 9 是降噪滤波器。

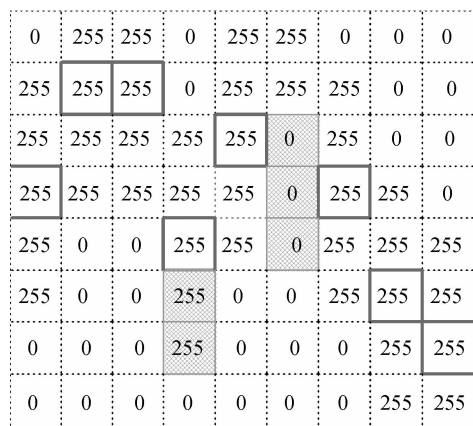


图 9 噪声滤波算法
Fig. 9 Filter for getting rid of single-sticked white and black lines

根据图 9 滤波器, 所有黑、白单像素噪声被滤掉, 结果为图 10。

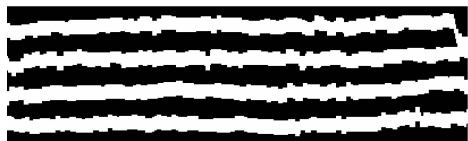


图 10 噪声滤波结果
Fig. 10 Filtered fringes

对图 10 隧道探索,类似于前面的追踪条纹极值算法,这里追踪亮条纹的列中心,然后提取各亮条纹的列中心数据,即获得亮条纹分布数据.其中图 10 中第三条亮条纹数据(反相)如图 11 所示.

图 11 是图 3(a)的第三条亮条纹分布数据,同样的方法可以获得图 3(b)的第三条亮条纹的分布数据,并进一步计算条纹偏移量.从而获得 45° 投影方向上,图 3 中第三条亮条纹所在截面的光学计算机层析(Optical Computerized Tomography, OCT)投影.同样的方法我们获得了 $22^\circ, 66^\circ, 88^\circ, 110^\circ, 132^\circ, 154^\circ, 176^\circ$ 投影方向的 OCT 投影,这 8 个投影被用来迭代重建热流场的折射率截面分布.

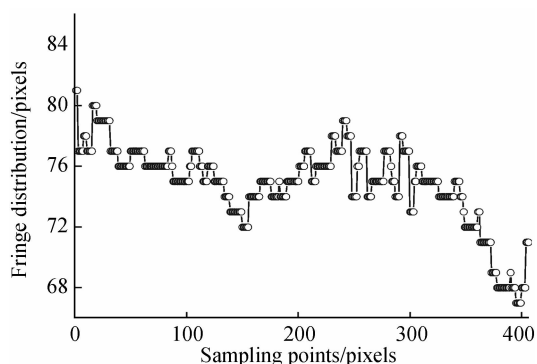


图 11 提取的图 10 中第三条亮条纹分布数据
Fig. 11 The third bright fringe distribution in figure 10

3 重建

重建算法采用本课题组开发的非线性自适应代数迭代重建算法(Nonlinear Auto-adjusting Iterative Reconstruction Technique, NAIRT),该算法应用于莫尔偏折层析可以表示为^[5]

$$f_{i,j}^{(time,m+1)} = f_{i,j}^{(time,m)} + \omega \frac{P_{0m} - P_m^{time}}{\sum_{i=0}^{49} \sum_{j=0}^{49} (B_{m-i,j})^2} B_{m-i,j} \lambda \quad (0 \leq m \leq M-1) \quad (1)$$

式中, ω 是松弛因子,用以调节修正深度(这里 $\omega=2.0$), λ 是非线性迭代因子,这里 $\lambda = \sqrt{f[i][j]^{time}/C_{time}}$, $f[i][j]^{time}$ 是当前场的第 $[i,j]$ 个网格值. C_{time} 是与迭代序数有关的准常数, $time$ 表示迭代循环序数. m 代表扫描线序数,这里扫描线总数 $M=100$. $B_{m-i,j}$ 是第 $[i,j]$ 个网格的偏折系数.应用式(1),对提取的 8 个方向投影迭代重建,获得热流场截面的折射率分布,进一步经 Gladstone-Dale^[11] 变换

转换为温度分布,层析温度结果在图 12 给出.

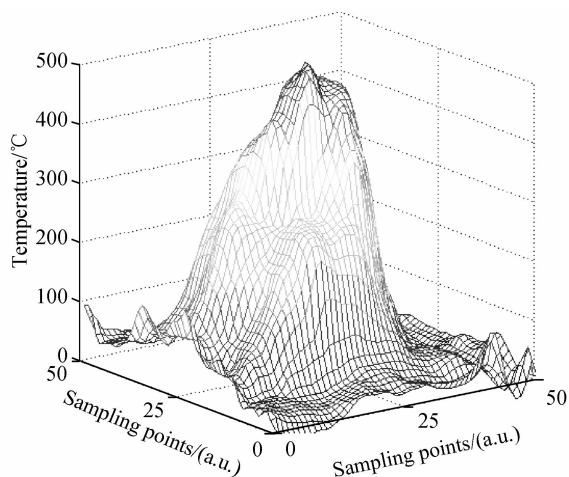


图 12 重建的截面温度分布
Fig. 12 Reconstructed temperature distribution

4 结果和讨论

从图 12 可见,重建截面的最高温度是 492°C ,电烙铁的最高额定表面温度大约是 500°C ,图 3 中第三条亮条纹恰恰在电烙铁的上方接近表面位置,所以我们认为重建结果是有效的.图 12 是热流场的一个横截面上温度分布信息,同样的方法可以获得任意截面的温度分布数据,从而实现对流场的物理诊断.

5 结论

应用隧道探索算法对实验莫尔条纹进行条纹追踪,精确提取了条纹偏移量,进一步转换为 OCT 投影,迭代重建截面温度分布.结果发现,应用 TEA 追踪莫尔条纹,提取的投影能够正确重建热流场截面温度分布. TEA 能够精确追踪莫尔条纹,提取莫尔条纹偏移量.该算法很值得其他类条纹分析借鉴.

参考文献

- [1] POKORSKI K, PATORSKI K. Visualization of additive-type moiré and time-average fringe patterns using the continuous wavelet transform[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): 3640-3651.
- [2] XU Z, TAYLOR H, BONING D, et al. Large-area and high-resolution distortion measurement based on moiré fringe method for hot embossing process[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(21): 18394-18407.
- [3] SONG Y, ZHANG B, HE A. Algebraic iterative algorithm for deflection tomography and its application to density flow fields in a hypersonic wind tunnel[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(31): 8092-8101.
- [4] CHEN Y, SONG Y, LI Z, et al. Influence of pressure distribution on flow field temperature reconstruction [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(15): 2145-2151.
- [5] SONG Y, SUN T, QU P. Nonlinear auto-adjusting iterative reconstruction technique (NAIRT) for interferometric tomography[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(7): 074107.
- [6] CHEN Y, LI Z, SONG Y. Extension of the Gladstone-Dale equation for flame flow field diagnosis by optical computerized

- tomography[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(13): 2485-2490.
- [7] CHEN Y, ZHANG C, GU F, *et al.* Ionization effect on arc plasma's optical diagnosis by the measurement of the refractive index[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(16): 3397-3402.
- [8] JITENDRA D, SHASHI P, SANTOSH R, *et al.* Slope measurement of bent plates using double grating shearing interferometry[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(18): 2958-2963.
- [9] SERVIN M, RODRIGUEZ-VERA R, CARPIO M, *et al.* Automatic fringe detection algorithm used for moiré deflectometry[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(22): 3266-3270.
- [10] CANABAL H, QUIROGA J A, BERNABEU E. Automatic processing in moiré deflectometry by local fringe direction calculation[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(25): 5894-5901.
- [11] ZHANG Bin, SONG Yang, SONG Yi-zhong, *et al.* A new reconstruction algorithm for Moiré tomography in flow field measurements [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45** (11): 117002.
- [12] FANG Jing-yue, QIN Shi-qiao, WANG Sheng-shu, *et al.* Frequency domain analysis of small angle measurement with moire fringe[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39** (4): 709-713.
方靖岳,秦石乔,王省书,等.莫尔条纹法测量微小旋转角度的频域分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 709-713.
- [13] OPPENHEIM A V, WILLISKY A S, NAWAB S H. Signals and systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [14] 郑君里,应启珩,杨为理. 信号与系统[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [15] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics[M]. QIN Ke-cheng, LIU Pei-sen, CHEN Jia-bi, *et al.*, transl. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2011.
- Goodman J W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克强,刘培森,陈家璧等,译. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [16] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. YANG Jia-sun, transl. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2012.
- Born M, Wolf E. 光学原理[M]. 杨葭菀,译. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [17] WU Ling-ling, WU Guo-jun, CANG Yu-ping, *et al.* Image processing of Moiré fringes of measuring focal length of lens based on Talbot-Moire[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39** (9): 1723-1727.
吴玲玲,吴国俊,仓玉萍,等.基于Talbot-Moiré法测量透镜焦距的莫尔条纹的图像处理[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1723-1727.
- [18] WANG Ye. Moire fringe analysis on digital holographic storage[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2972-2974.
王也.莫尔条纹分析在数字全息存储器中的应用[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2972-2974.
- [19] SONG Y, CHEN Y Y, HE A Z, *et al.* Theoretical analysis for Moiré deflectometry from diffraction theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2009, **26**(4): 882-889.
- [20] ZHANG Bin, SONG Yang, SONG Yi-zhong, *et al.* Flow field Moiré tomography based on phase unwrapping and a new iterative reconstruction algorithm [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2006, **33**(4): 531-536.
张斌,宋暘,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.