

文章编号: 0253-2239(2006)10-1501-5

使用叠栅层析技术测量超音速风洞中的 非对称复杂密度场*

张 斌 宋 畅 宋一中 贺安之

(南京理工大学信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 使用叠栅层析技术解决超音速风洞中复杂密度场的测量难题。应用高灵敏度叠栅偏折仪和间隔角度旋转模型的方法获取超音速风洞中流场的多方向叠栅条纹图。层析计算中使用一种新的偏折角修正迭代的叠栅层析算法,该方法可以实现对有限角采样和包含遮挡物的非完全数据重建,迭代过程中结合内边界平滑滤波提高重建精度。实验中获取了马赫数为 2.52 的超音速风洞中 9 幅不同采样角的条纹图,经过 50 次迭代计算后重建出膨胀波区非对称密度场的截面分布,并对测量结果和误差进行了分析和讨论。使用计算流体力学技术对该密度场进行建模和计算,验证了叠栅层析重建结果的正确性,证实了该技术在测量复杂流场领域的重要价值。

关键词: 信息光学; 流场重建; 叠栅层析; 超音速风洞

中图分类号: O438 文献标识码: A

Measurements of Asymmetric Complex Density Distribution in Supersonic Wind Tunnel by Moiré Tomography

Zhang Bin Song Yang Song Yizhong He Anzhi

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

Abstract: Moiré tomography is applied to measure the complex density distribution in supersonic wind tunnel. Multidirectional moiré fringe patterns of flow field in supersonic wind tunnel are obtained by using high precision moiré deflectometer and discrete angle rotating mode. In the tomography, a new moiré tomographic algorithm with deflection angle revision iteration is employed to realize the limited angle sampling and incomplete data reconstruction containing covering. In the iterative process higher reconstructing precision is achieved by using inner boundary smoothing filtering. In experiments, 9 tomograms with different view angles in supersonic wind tunnel with Mach number 2.52 are obtained, the distribution on the cross section of asymmetric flow field in the swelling area of supersonic wind tunnel is reconstructed after 50 iterative computations, and the measured results and errors are analyzed and discussed. Computing fluid dynamics is used to simulate and compute the density field, verifies the validity of the reconstruction results of moiré tomography, and proves the important value of the technology in measuring complex fluid field.

Key words: information optics; flow field reconstruction; moiré tomography; supersonic wind tunnel

1 引 言

超音速风洞中的复杂流场测量是气动力学领域
仍未完全解决的难点,该种工况下的流场口径大,流

速高,包含遮挡物和激波,并且只能获取有限角采样的
非完全数据。光学测试技术因其非接触、可调视
场和实时显示等测量特性,在高速流场的诊断与测

* 中国博士后科学基金(200403612)资助课题。

作者简介: 张 斌(1978~), 山东人, 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, 四川人, 南京理工大学教授, 博士生导师, 主要从事复杂流场的测量和高速公路路面检测等方面的研究。E-mail: haz@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2005-11-02; 收到修改稿日期: 2006-02-27

量方面得到了应用。其中,较早的纹影和阴影技术灵敏度低,无法显示复杂流场的激波精细结构和模型边界层转捩区,很难进行定量计算。干涉技术精度高,但对测试时的机械稳定性提出了很高的要求;此外,高速流动会使得激波区内的干涉条纹发生压缩和跃变,造成条纹级序判读困难。因此,通常使用干涉层析技术测量相对稳定的低温流场^[1,2]和低马赫数流场^[3~5]。叠栅技术因其动态范围大、调节方便、对光源的要求不高、抗干扰性能好等优点成为高速流场测试的最佳方案。20世纪80年代以来,国内外学者已经使用该技术对多种复杂流场进行了直观显示^[6~8],然而对流场参量分布的重建并未完全实现。使用逆阿贝尔变换算法^[6,7]可以实现轴对称场的计算,但对于包含遮挡物、有限角采样的非对称场,更宜使用代数重建算法^[9]。已有的叠栅层析代数迭代算法通过积分将叠栅投影数据转化为干涉投影数据^[10],不可避免地造成了误差的累加。

本文使用高灵敏度叠栅偏折仪获取条纹图,采用直接修正偏折角的迭代算法进行重建计算。针对遮挡物和有限角采样造成的数据不完全,在迭代过程中结合内边界平滑滤波提高重建精度。实验中完成了对超音速风洞中非对称复杂密度场的测量。

2 有限角条件下包含遮挡物的叠栅层析重建技术

考虑 xy 平面的光学层析问题,在图1所示的坐标系下,光线沿轴 x' (光轴) 方向入射,经过待测场后产生了偏折角 φ 。在小角度偏折情况下,光线在 y' 轴方向的偏折角为

$$\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y'} dx', \quad (1)$$

式中 n_0 为环境折射率(参考折射率), n 为折射率。

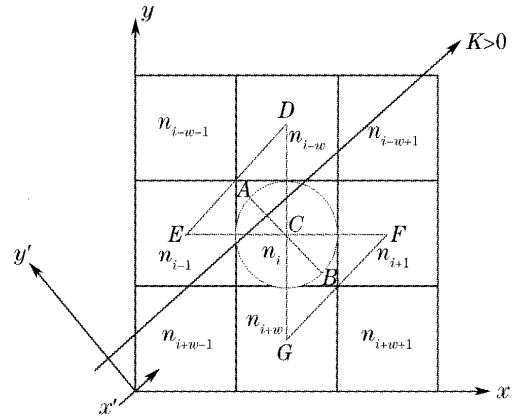


图1 重建算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reconstruction algorithm

数值计算采用网格法(微元法),将折射率场划分为 $k = N \times N$ 个足够小的相等网格,网格边长为 d ,设每一网格内的折射率变化 Δn 为常数,设有 p 个投影方向,每个投影方向上有 m 条射线,则该平面内任一光线的偏折角可以写成

$$\sum_{i=0}^{k-1} A_{ij} \left(\frac{1}{n_0} \frac{\partial n_i}{\partial y'} \right) = \varphi_j, \quad j = 0, \dots, (m-1) \times p \quad (2)$$

其中 A_{ij} 为第 j 条光线通过第 i 个网格的长度, φ_j 为第 j 条光线的偏折角。

首先求 $\partial n_i / \partial y'$ 项,如图1所示, C 为 n_i 所在网格的内切圆,直径 AB 垂直于射线,当射线斜率 $K > 0$ 时, n_i 处的微分项 $\partial n_i / \partial y'$ 表示为 $(n_A - n_B) / 2r$, r 为内切圆半径。利用解析几何关系求 A 、 B 点的坐标, A 点的折射率由平面 CDE 确定,即由 n_{i-w} 、 n_i 和 n_{i-1} 确定;同理,利用 n_{i+w} 、 n_i 和 n_{i+1} 也可表达出 B 点的折射率。从而在 $K > 0$ 时得到

$$\frac{\partial n_i}{\partial y'} = \frac{n_A - n_B}{2r} = \frac{K}{\sqrt{1+K^2}} \frac{n_{i-1} - n_{i+1}}{2d} + \frac{1}{\sqrt{1+K^2}} \frac{n_{i-w} - n_{i+w}}{2d}, \quad (3)$$

所以(2)式改写为

$$\sum_{i=0}^{k-1} A_{ij} \left(\frac{K}{\sqrt{1+K^2}} \frac{n_{i-1} - n_{i+1}}{2d} + \frac{1}{\sqrt{1+K^2}} \frac{n_{i-w} - n_{i+w}}{2d} \right) = n_0 \varphi_j, \quad j = 0, \dots, (m-1) \times p, \quad (4)$$

以 n_i 为研究对象并进行边缘修正,上式经过推导出

$$\sum_{i=0}^{k-1} \left[K \frac{A_{(i+1)j} - A_{(i-1)j}}{d} + \frac{A_{(i+w)j} - A_{(i-w)j}}{d} \right] n_i + n_0 \left[\left(\sum_{\text{top}} A_{ij} - \sum_{\text{bottom}} A_{ij} \right) / d + K \left(\sum_{\text{left}} A_{ij} - \sum_{\text{right}} A_{ij} \right) / d \right] = 2n_0 \varphi_j \sqrt{1+K^2}, \quad (5)$$

这样,叠栅层析公式转变为线性方程组,再经过拆分和移项等技巧处理,迭代公式最终写为

$$\mathbf{Cn} = \mathbf{h} - \mathbf{q} + \mathbf{Dn}, \quad \mathbf{Dn} = \mathbf{Cn} - \mathbf{h} + \mathbf{q}, \quad (6)$$

其中

$$C_{ij} = K \frac{A_{(i+1)j}}{d} + \frac{A_{(i+\omega)j}}{d}, \quad (7)$$

$$D_{ij} = K \frac{A_{(i-1)j}}{d} + \frac{A_{(i-\omega)j}}{d}, \quad (8)$$

$$q_j = n_0 \left[\left(\sum_{\text{top}} A_{ij} - \sum_{\text{bottom}} A_{ij} \right) / d + K \left(\sum_{\text{left}} A_{ij} - \sum_{\text{right}} A_{ij} \right) / d \right], \quad (9)$$

$$h_j = 2n_0 \varphi_j \sqrt{1 + K^2}. \quad (10)$$

用同样的方法可以推得 $K < 0$ 及光线入射角为 0° 和 90° 的层析公式。具体迭代形式为

$$\begin{cases} n_i^{(s+1)} = n_i^{(s)} + \omega \frac{\left[h_j - q_j + \sum_{i=0}^{k-1} D_{ij} n_i^{(s)} \right] - \sum_{i=0}^{k-1} C_{ij} n_i^{(s)}}{\left(\sum_{i=0}^{k-1} C_{ij} \right)^2} C_{ij}, \\ n_i^{(s+1)} = n_i^{(s)} + \omega \frac{\left[q_j - h_j + \sum_{i=0}^{k-1} C_{ij} n_i^{(s)} \right] - \sum_{i=0}^{k-1} D_{ij} n_i^{(s)}}{\left(\sum_{i=0}^{k-1} D_{ij} \right)^2} D_{ij}, \end{cases} \quad j = 0, \dots, (m-1) \times p \quad (11)$$

式中 ω 为松弛系数。为了改善重建结果,将迭代公式分成两个对等的方程,相应的每步迭代包含两个对等的部分,这样可以有效改善拆分和移项造成的不平衡。

对遮挡物部分的处理是,当光线遇到遮挡物时,跳过该次迭代过程,直到光线能够完全穿过被测场时再进行修正迭代。测试中所用模型通常为圆柱、圆锥体。模拟实验时发现,由于有限角和遮挡物造成数据严重不完全,使得遮挡物边界重建效果极差。随着迭代次数的增加,这种影响会扩散到整个重建区域,导致重建精度下降,甚至根本无法得到有效结果。因此,需要对遮挡物的边界区域进行滤波处理。将重建的正方形区域中心定为坐标原点,定义外边界半径,有

$$R_{\text{out}} = R_{\text{in}} + d_s, \quad (12)$$

其中 R_{out} 为外边界半径, R_{in} 为所测截面内的遮挡物圆半径, d_s 为划分网格的边长。如果被考察网格 n_i 中心坐标满足

$$R_{\text{in}} \leq \sqrt{x_i^2 + y_i^2} < R_{\text{out}}, \quad (13)$$

确定该点为内边界点。

如图 2,实线为 R_{in} 界线,虚线为 R_{out} 界线。网格点 n_i 是内边界点,将该点与其邻域网格内所有满足 (13) 式的点(图中标记 *) 进行平滑滤波,并用滤波结果替代 n_i 。根据投影采样方向数、遮挡物尺寸、成像质量等因素,确定每隔一定迭代次数后都以此算法对所有内边界点进行滤波操作,可以有效提升重建效果。

在得到折射率分布后,根据折射率 n 与密度 ρ

之间的关系^[8]

$$n - 1 = 0.227\rho, \quad (14)$$

即可求出被测流场截面的密度分布。

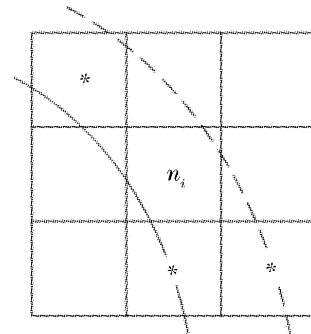


图 2 内边界平滑滤波算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of smoothing algorithm for inner boundary

3 实验与结果

超音速风洞中非对称模型生成的流场很复杂,由于技术和费用的原因,在风洞中很难架设光路同时获取多方向条纹图,于是采取了间隔一定角度旋转模型进行采样的方法。使用高灵敏度叠栅偏折仪^[11,12]进行测量实验,偏折仪光路如图 3 所示。激光被透镜 L_1 扩束,在两个凹面镜 M_1 和 M_2 之间形成平行光,光束被 M_2 反射后通过光阑 d_1 ,再经过准直透镜 L_2 成为小口径平行光。光栅 G_1 和 G_2 放置在小口径平行光路中,检测光线的偏折。 L_3 为成像透镜,由小孔光阑 d_2 可获取一级衍射频谱并把被测流场成像在底片 P 上。实验模型如图 4 所示,在风

洞中尖锥迎着来流。实验条件如下：风洞的喷口直径为 0.6 m，工作区域直径为 1.2 m，通光口径为 0.5 m；大气温度 8 °C，大气压 101.87 kPa，来流马赫数 2.52；光栅常量 $d = 0.05$ mm，光栅间距 $\Delta = 16.8$ cm。模型固定好后，开启风洞，每隔 15° 旋转模型，待来流相对稳定时采集条纹图，图 5 为 45°~165° 间的 9 次采样。由于视场有限，图像中并没有显示外激波区，但却清晰地反映了模型后部膨胀波区的复杂流动。对图像进行标定后，截取模型后部 1 cm、大小为 7.5 cm × 7.5 cm 的截面区域进行重建。图像经过预处理、细化后，使用条纹跟踪技术获取条纹偏移信息。迭代过程中，划分 30 × 30 网格，每个方向采样数为 120，每迭代 5 次进行一次滤

波操作，迭代 50 次后得到重建结果。

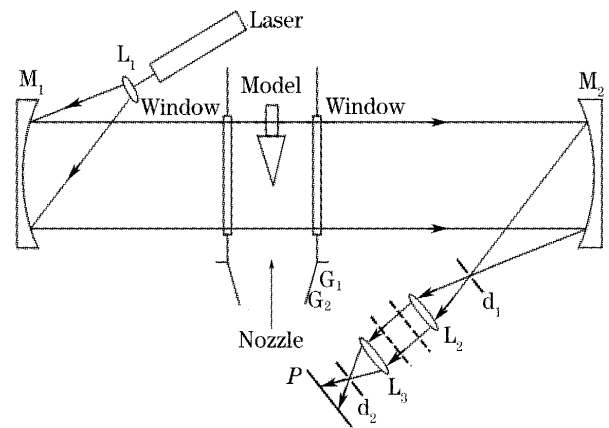


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

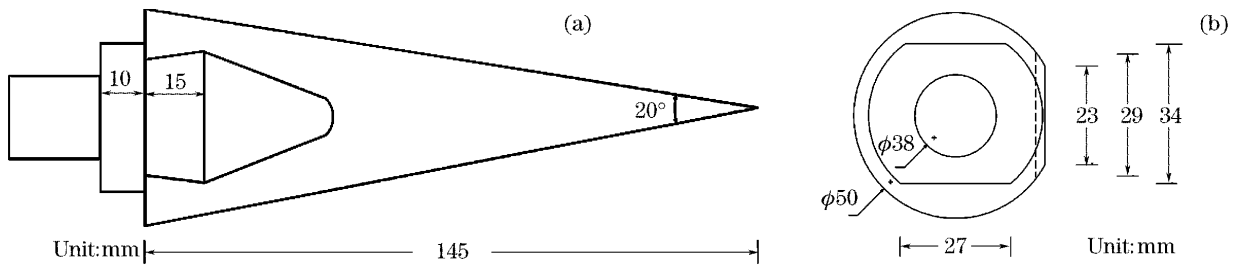


图 4 实验模型。(a)主视图,(b)左视图

Fig. 4 Experimental model. (a) Front view, (b) left view

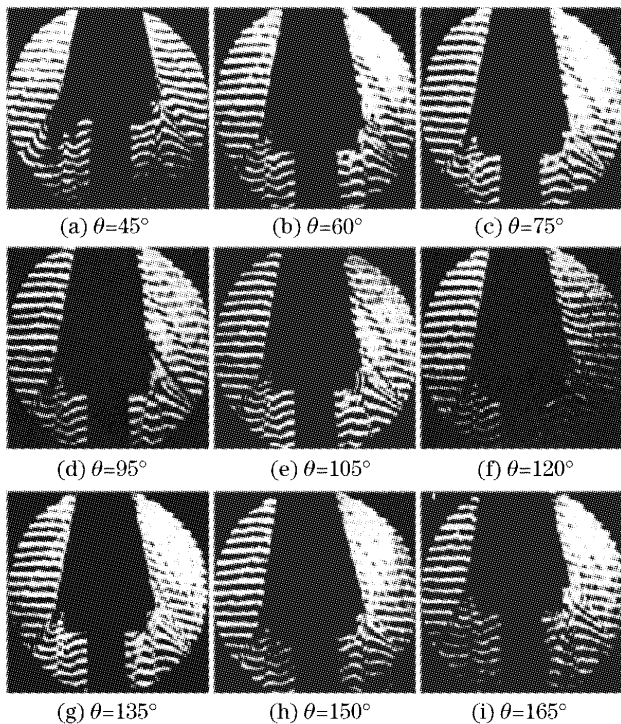


图 5 超音速风洞中非对称流场的多方向叠栅偏折图
Fig. 5 Multidirectional moiré deflectograms of asymmetric flow field in supersonic wind tunnel

图 6 显示了重建区域的相对密度分布 ρ/ρ_0 ，其中 ρ_0 是外激波和膨胀波之间相对稳定的密度值。从图中可以看出，膨胀波区的密度由外向内呈下降趋势。由于重建区域并没有越过膨胀波区的边界，因此密度并没有出现台阶式的跃变；同时，该区域所受圆锥上缺失部分的影响也较小，并未明显反映出该部分造成的复杂密度变化，重建结果中靠近遮挡物处的密度起伏主要是圆锥下方劈棱造成的影响。在靠近膨胀波边界的区域，密度值下降较快，随后相对密度值便稳定在 0.3~0.4 附近。使用计算流体力学技术对整个流场进行建模和计算，得到重建截面内 10 cm × 10 cm 区域的等密度线图(如图 7 所示)，图中标注的密度值单位是 kg/m³。由于实验模型很复杂，在建模时对圆锥下部的劈棱作了简化处理，使该部分成为完整的圆柱体，因此该计算等密度线图较明显地区别于层析重建结果。图 7 显示，膨胀波区由外向内密度值呈下降分布，从外激波向轴心靠近的过程中，密度的变化趋势与层析结果相似。在靠近遮挡物的区域，相对密度值稳定在 0.3 附近，这与重建结果相符。

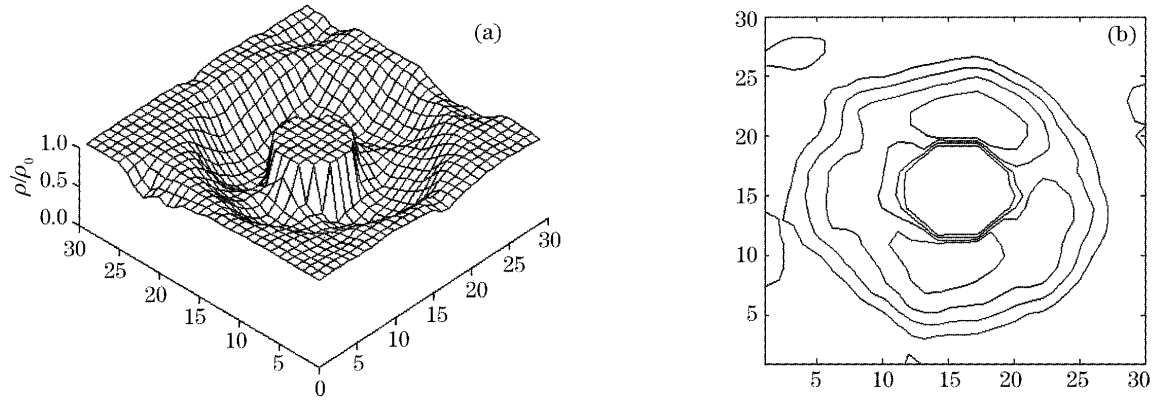


图 6 重建截面区域的密度分布。(a)该截面的密度分布,(b)该截面的等密度线图

Fig. 6 Reconstructed density distributions at a designated section. (a) 3-D density distribution of the cross section, (b) density contour map of the cross section

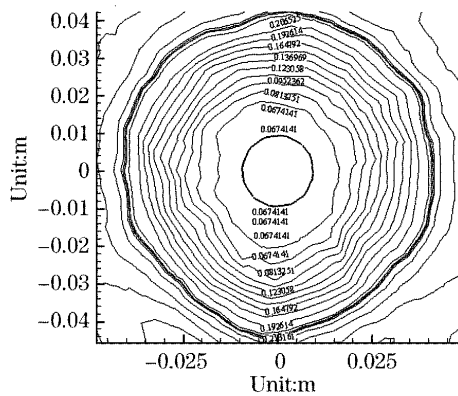


图 7 使用计算流体力学技术重建的截面密度分布
Fig. 7 Reconstructed density distributions by fluid dynamical analysis and computation

4 结 论

本文使用的叠栅偏折仪具有高灵敏度和较大口径,直接使用偏折角进行修正迭代的重建算法,避免了已有算法中将叠栅层析转化为干涉层析过程中的积分过程,具有更直观的物理意义和更广泛的适用范围。叠栅技术在测量一些特殊流场时确有其他技术无法比拟的优势,但显示过程和计算过程还是会不可避免地引入误差。超音速风洞的工况不可能达到真正意义的稳定状态;为了采集多方向条纹而旋转模型,每次开启风洞时也只能得到近似相同的初始工况;由于光栅副至被测区中心的距离偏大,光线在径向有较大偏折效应使激波在显示时变厚。在重建过程中,条纹图经过预处理、细化后会产生间断,对其进行修整时便会受到主观因素的影响;风洞中复杂流场中包含遮挡物并只能有限角采样造成了重建信息严重不完全,直接影响到被测区域的重建精度,并造成重建区域边界的波动。因此,本实验通过改善光学元件质量、精确调节光路来降低系统误差,

采用新的重建算法和滤波操作以提高重建精度,测量结果与理论分析计算相符合,显示了叠栅层析技术在测量复杂流场领域的重要价值。

参 考 文 献

- 1 Yao Wei, He Anzhi. Three-dimensional flow field tomography based on phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18** (11): 1562~1566 (in Chinese)
姚 卫, 贺安之. 基于相位展开的三维流场干涉层析[J]. *光学学报*, 1998, **18**(11): 1562~1566
- 2 Yan Dapeng, Liu Feng, Wang Zhendong *et al.*. A modified ART reconstructive technique and its application to three-dimensional temperature field[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9): 1296~1300 (in Chinese)
阎大鹏, 刘 峰, 王振东 等. 一种改进的代数迭代重建技术及其在三维温度场再现中的应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(9): 1296~1300
- 3 Charles M. Vest, Ivan Prikryl. Tomography by iterative convolution: empirical study and application to interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(14): 2433~2440
- 4 C. Söller, 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
- 5 Wang Jiangang, Miao Xinghua, Wang Guozhi *et al.*. Two-exposure holography for study of shockwave flow generated by a model in a supersonic wind channel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(4): 374~378 (in Chinese)
王建岗, 苗兴华, 王国志 等. 双曝光全息干涉法用于风洞中激波流场的研究[J]. *光子学报*, 1997, **26**(4): 374~378
- 6 O. Kafri, I. Glatt. Moire deflectometry: A ray deflection approach to optical testing[J]. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6): 944~960
- 7 J. Stricker, E. Keren, O. Kafri. Axisymmetric density field measurements by moire deflectometry[J]. *AIAA*, 1983, **21**(12): 1767~1769
- 8 J. Stricker, O. Kafri. A new method for density gradient measurements in compressible flows[J]. *AIAA*, 1982, **20**(6): 820~823
- 9 Wan Xiong, He Xingdao, Gao Yiqing. A novel limited-view tomography algorithm based on maximum entropy and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1433~1438 (in Chinese)
万 雄, 何兴道, 高益庆. 一种少投影光学层析新算法及其应用

- [J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1433~1438
- 10 Yan Dapeng, Liu Feng, Wang Zhendong *et al.*. Moire tomography by ART[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2861**: 146~150
- 11 Yan Dapeng, Wang Hailin, He Anzhi *et al.*. High sensitivity moire deflectometry and its application in flow field of hypersonic shock tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1994, **12**(1): 43~50 (in Chinese)
- 阎大鹏, 王海林, 贺安之 等. 高灵敏度叠栅偏折法及其在激波风洞流场中的应用[J]. *空气动力学学报*, 1994, **12**(1): 43~50
- 12 He Anzhi, Yan Dapeng, Ni Xiaowu *et al.*. Design and application of real-time holographic large-aperture Moiré deflector with high sensitivity and high precision [J]. *Chin. J. Lasers*, 1991, **18**(11): 827~831 (in Chinese)
- 贺安之, 阎大鹏, 倪晓武 等. 实时大口径高灵敏度高精度莫尔偏折仪的设计和应用[J]. *中国激光*, 1991, **18**(11): 827~831

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自2004年5月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款2800元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn