

文章编号: 0253-2239(2005)04-479-6

虚拟和真实实验相融合的三维非完全数据层析

姚红兵¹ 贺安之² 吴颖川³ 乐嘉陵³

1 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013
2 南京理工大学信息物理与工程系, 南京 210094
3 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 绵阳 621000

摘要: 为了解决非完全数据条件下复杂流场的三维层析重建, 结合计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)、计算流动显示技术(Computational flow imaging, CFI)和光学层析技术(Optical computerized tomography, OCT), 提出了应用于非完全数据流场重建的虚拟实验和真实实验相融合(即 CFD, CFI 与 OCT 融合)的三维层析。非对称双峰温度场实验结果表明, 与完全数据重建结果相比, 虚拟实验与真实实验相融合的三维层析的重建双峰误差小于 5%。因此能够更好地实现非完全数据条件下流场的三维重建, 极大地提高非完全数据条件下流场重建的真实性, 较好地与实际结果相吻合, 从而为解决有限角条件下的严重非完全数据流场的重建开拓了一条新途径。

关键词: 信息光学; 算法理论; 层析; 计算流体力学; 计算流动显示技术; 融合
中图分类号: TP391 文献标识码: A

Three-Dimensional Tomography of Incomplete Data with Fusion of Virtual and Real Experiments

Yao Hongbing¹ He Anzhi² Wu Yingchuan³ Le Jialing³

1 School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013
2 Department of Information Physics & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094
3 China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000

Abstract: The optical computerized tomography (OCT) of incomplete data for three-dimensional detection of complex flow field is urgent to be but still not be resolved. A new three-dimensional tomography with the fusion of virtual and real experiments is proposed, which combines the technology computational fluid dynamics (CFD), computational flow imaging (CFI), and OCT. The experimental results of double-peak temperature field indicate that, compared with the reconstructed results of full data, the error of unsymmetrical the double-peak reconstructed by the three-dimensional tomography with fusion of virtual and real experiments is less than 5%. So this new three-dimensional tomography can reconstruct the flow field of incomplete data satisfactorily, improve the reconstruction resolution greatly, and thus provides a brand-new way for the incomplete data reconstruction with limited viewing angle.

Key words: information optics; algorithm theory; tomography; computational fluid dynamics; computational flow imaging; fusion

1 引 言

在现代航空、航天、兵器和能源等领域, 复杂气动流场中的温度或密度的定量测试是其中的关键技术问题, 例如导弹周围的流场分布、风洞里的温度和压力分布等等^[1,2]。光学层析技术(OCT)由于有着非接触、无干扰等优点, 在这类测试中得到了大力发

展并有着广泛的应用前景。然而自 20 世纪 90 年代后这类研究进展缓慢, 逐渐降温, 成为至今仍未解决的世界难题, 和早已产品化的医学层析技术(CT)相比差距很大。

层析从物理上讲是将一个复杂的三维立体测量简化为对一系列层面的二维测量, 进一步再将复杂

作者简介: 姚红兵(1976~), 男, 博士, 主要从事光学计算机层析技术在三维流场中的测试研究工作。

E-mail: alenyao76@ahoo.com.cn.

收稿日期: 2004-05-27; 收到修改稿日期: 2004-10-22

的二维问题简化为对平面上多方向一维投影数据的测量,每个投影就是沿射线的积分值,从数学上讲,层析技术问题是—个从多方向积分方程的反演层面原场的问题。除像轴对称这样一些特殊情况外,层析技术问题一般是得不到严格解的。只有当线性独立方程数充分多,并可和待求场的离散元数相当时,方程组才有唯一或正确的解,否则是不确定或无解的。医学层析技术可得到 180° 内充分多方向投影,因此可得到一个较满意的结果,但对瞬态流场很难同时得到充分多方向投影数据,特别对基本流场实验设备——风洞中的气动实验,由于测量窗的观察角不到 50° ,还有实验模型的遮挡,使投影数据很不完全,形成严重的不确定或严重病态,因此很难得到确定的解。所以非完全数据问题成为复杂流场层析技术测量的瓶颈,尽管许多学者进行了大量的研究,如将其他手段获得的孤立的点测量值融合到光学层析技术重建中^[3],或利用实验模型的对称性进行采样等,但对于如重建风洞中的流场这样既是最有应用价值的实际工程问题,也是急待解决的层析技术重建测量问题,却至今仍未突破这一瓶颈。我们和中国国家气动中心等多个单位合作为具有重大工程需求的复杂流场的三维层析技术进行了长期的研究。本文中,我们针对非完全数据的重建方程本身的病态特点,采用代数重建法(Algebra tomography, ART)进行重建^[4~7],结合计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)和计算流动显示(Computational flow imaging, CFI)技术,开拓了一条解决有限角条件下的严重非完全数据流场的重建的新途径——虚拟实验和真实实验相融合(即 CFD, CFI 与光学层析技术融合)的三维层析。

2 非完全数据光学层析技术的代数重建法

对于非完全数据的重建,通常采用的有效算法是代数重建法。假设一条光线以直线穿过待测三维温度场,则光线在某一层面沿光线通过相位物体路径方向上的光程差可以用下式表示:

$$M(P, \theta) = \int_L [n(x, y, z_0) - n_0] ds, \quad (1)$$

式中 M 代表光程差,可以由干涉条纹的漂移获得, n 和 n_0 分别表示被测场折射率和真空折射率,从而可以得到相位差

$$m(P, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot M(P, \theta). \quad (2)$$

为重建方便,我们根据图 1 引入如下坐标变换:

$$\begin{cases} P = -x \sin \theta + y \cos \theta, \\ \varphi = \arctan(y/x), \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ 为观察角, P 确定了探测光线的位置。

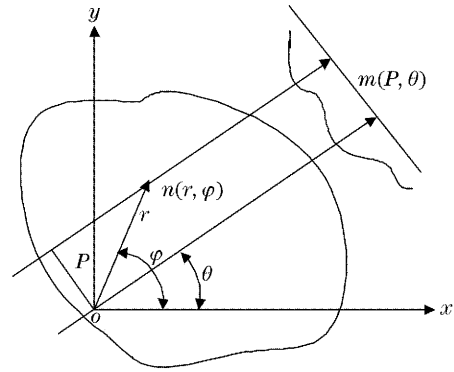


图 1 坐标变换示意图

Fig. 1 The schematic of the coordination transform

通过坐标变换,干涉方程可以用下式表示如下:

$$M(P, \theta) = \iint [n(r, \varphi) - n_0] \cdot \delta[P - r \sin(\varphi - \theta)] dx dy, \quad (4)$$

其中 δ 是狄拉克函数, (4) 式右端的曲线积分表示了折射率增量 $[\Delta n(r, \varphi) = n(r, \varphi) - n_0]$ 沿光线通过相位物体路径方向的线积分。上述变换称为 Radon 变换, (4) 式右端是 $\Delta n(r, \varphi)$ 的二维 Radon 变换。由此可见,相位物体的干涉图实际上就是 $\Delta n(r, \varphi)$ 的 Radon 变换等高图。

对 (4) 式进行 Radon 反变换,可得 $\Delta n(r, \varphi) = n(r, \varphi) - n_0$ 的精确解:

$$\Delta n(r, \varphi) = n(r, \varphi) - n_0 = \frac{1}{2\pi^2} \int d\theta \int \frac{[\partial M(P, \theta) / \partial P] dP}{r \sin(\varphi - \theta) - P}, \quad (5)$$

采用代数重建法^[7],可以得到 Δn 的迭代方程:

$$\begin{aligned} \Delta n_k^{(i)}(x, y) &= \Delta n_k^{(i-1)}(x, y) + \\ & \omega \frac{M_i(l, \theta) - \sum_{k=1}^n \Delta n_k^{(i-1)}(x, y) A_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik} - A_{ik}} \cdot A_{ik}, \\ & i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\Delta n_k^{(0)}(x, y)$ 是给定的初值, ω 为超松弛迭代系数。

根据以上算法,可以重建任一截面的折射率分布,结合格拉斯顿-戴尔(Gladstone-Dale)公式和气

体状态方程,可得到该截面的密度和温度场的分布。

3 虚拟实验和真实实验相融合的三维层析

众所周知,根据具体的实验的条件,可以通过数值计算获得流场中的温度、密度、压力等各种物理场,计算流动显示技术就是把数值计算获得的各种物理场,经过计算光学(全息干涉、纹影、阴影、平面激光诱导荧光)转换为所需的各个方向流动显示图像,目前最实用的计算流动显示技术是计算干涉技术等。

计算干涉技术模拟全息干涉图的成像原理,是把数值计算的计算结果转化为能够与实验图像进行直接比较的计算干涉图像^[8]。

根据全息干涉原理可知,光强度 I 与条纹位移 F 的关系为^[9]

$$I \propto \cos^2(\pi F), \quad (7)$$

条纹位移 F 的计算公式为

$$F = \frac{2\epsilon x}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \int_{\xi_2}^{\xi_1} [n(x, y, z) - n_0] dz, \quad (8)$$

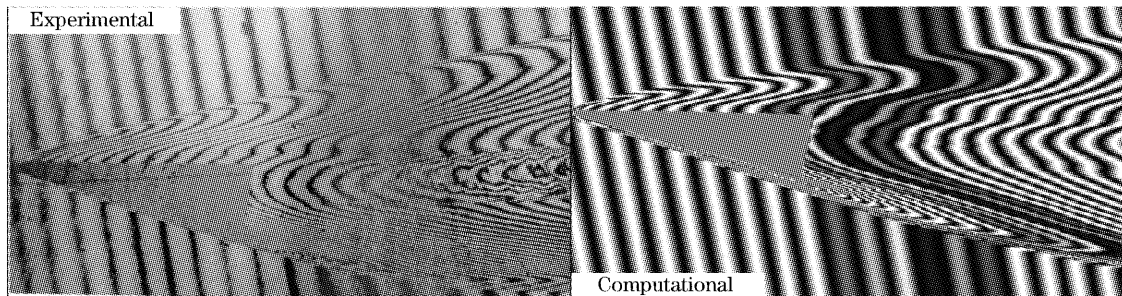


图2 弹道靶中钝锥流场的计算干涉图与试验干涉图的比较(三维)

Fig. 2 Comparison of experimental and computational interferograms for blunted cone hypersonic flow in a ballistic range (three-dimensional flow)

对于复杂流场来讲,尤其对于风洞中的超高音速流场以及出现激波和涡旋的流场,由于风洞中观察视角的限制,要实现各个方向的计算所得虚拟实验干涉图与真实实验干涉图进行比较,在现阶段,显然是不现实的。然而,在三维流场的研究中,计算流动显示是一种重要的实验验证手段,利用数值计算和计算流动显示技术获得的虚拟实验干涉图完全可以作为先验知识成为非完全数据光学层析技术重建中的可利用信息,为此,我们提出了虚拟实验和真实实验相融合的三维层析。

由于光学层析技术所要面对的是诸如超音速风洞中等复杂流场,大多为有限角采样,有时只有 30°

其中 $[n(x, y, z) - n_0]$ 是相对于参考流场的折射率增量, ϵ 是马赫-曾德尔干涉仪两块分光板的角角度差, λ 是光源波长,光线路径沿 z 方向,从 z_1 到 z_2 。如果 $\epsilon = 0$,干涉图是无限条纹模式;如果 $\epsilon > 0$ 或 $\epsilon < 0$,干涉图是有限条纹模式。

将干涉图的光强度按比例转换为计算机显示器的像素亮度就可以得到最终的图像。

根据具体的实验条件,利用数值计算和计算流动显示技术,可以获得流场中的温度、密度、压力等各种物理场,经过计算光学(全息干涉、纹影、阴影、平面激光诱导荧光)转换为各个方向上的计算干涉图像,这种计算干涉图像称为虚拟实验干涉图,而在实验中实测获得的干涉图称为真实实验干涉图。将所得的虚拟实验计算干涉图与真实实验干涉图进行比较,如图2所示。如果各个方向的计算所得虚拟实验干涉图均与真实实验干涉图吻合,就可以将虚拟实验计算干涉图看作为真实实验干涉图,进一步可以认为数值计算获得的流场的温度、密度等的三维分布即为真实流场的温度、密度等的三维分布。目前这一方法已经在工程实际中得到证实和应用。

范围,所以实测中只能得到有限小角度范围内的投影干涉图,即真实实验干涉图。根据具体的实验条件,利用数值计算和计算流动显示技术,可以得到流场中各个方向上的虚拟实验干涉图。在虚拟实验和真实实验相融合的过程中,计算流动显示和数值计算成为有限角采样下光学层析技术重建的重要实验验证,这种验证的方法越多,验证的方向越多,最后得到的重建结果的可靠性就越大。因此,经过充分校验和验证的数值计算结果,完全能够用于补充光学层析技术重建中的不完全数据,从而大幅度改善光学层析技术重建的重建精度。所以,在虚拟实验和真实实验相融合的三维层析中,首先根据实验条件获

得有限角范围内的真实实验干涉图, 缺失角度范围内的干涉图利用数值计算获得的虚拟实验干涉图作为补充, 两者进行初始匹配后进行混合迭代, 从而将有限角条件下的非完全数据光学层析重建转化为完全数据的三维层析重建。在这种融合的三维层析过程中, 最需要注意的是虚拟实验干涉图和真实实验干涉图的初始角度匹配问题, 如果初始角度不匹配, 在随后的混合迭代中, 这种不匹配将极易被放大而使得最终结果产生致命的振荡。

4 实验结果及分析

具体实验中, 实验模型采用 2 个非对称排列的圆柱状散热体, 测试其散热产生的温度场分布。旋转干涉仪, 在 180° 范围内实时记录多方向干涉图, 实验环境温度为 10°C 。

取距离圆柱顶点 10 mm 的截面为重建截面, 根据理论计算和先验知识知道, 该截面上的温度分布呈双峰分布。利用双峰函数, 容易模拟出该温度场在各个方向上的虚拟实验干涉图。利用条纹跟踪法获得该截面各个方向上的条纹偏移量, 如图 3 为该

截面 1° 和 118° 方向上条纹的偏移量 (其中横坐标 L 代表采样数)。根据非完全数据条件下的代数重建算法, 可以得到该截面上的重建结果。采用三种不同的采样方式进行层析重建。首先利用全场 180° 范围采样获得的真实实验干涉图进行重建, 重建结果如图 4 所示 (其中 N 表示在计算中的网格数), 其中图 4(a) 为温度三维分布图, 图 4(b) 为等温曲线。其次采用虚拟实验和真实实验相融合的三维层析进行重建, 采样方式为正交小角度采样, 其中采样视角范围 $[20^\circ, 50^\circ]$ 内为真实实验干涉图, $[110^\circ, 140^\circ]$ 范围内采用虚拟实验干涉图, 图 5 为该采样方式下获得的重建结果 (其中 N 表示在计算中的网格数)。最后, $[20^\circ, 50^\circ]$ 采用真实实验干涉图, 在 $[0^\circ, 2^\circ]$ 和 $[50^\circ, 180^\circ]$ 角度范围内采用虚拟实验干涉图, 补入由虚拟实验干涉图获得的该截面上的条纹偏移量, 图 6 所示分别为 90° 与 150° 方向上虚拟实验干涉图中该截面上的条纹偏移量 (其中横坐标 L 代表采样数), 重建后所得结果如图 7 (其中 N 表示在计算中的网格数), 其中图 7(a) 为温度三维分布图, 图 7(b) 为等温曲线。

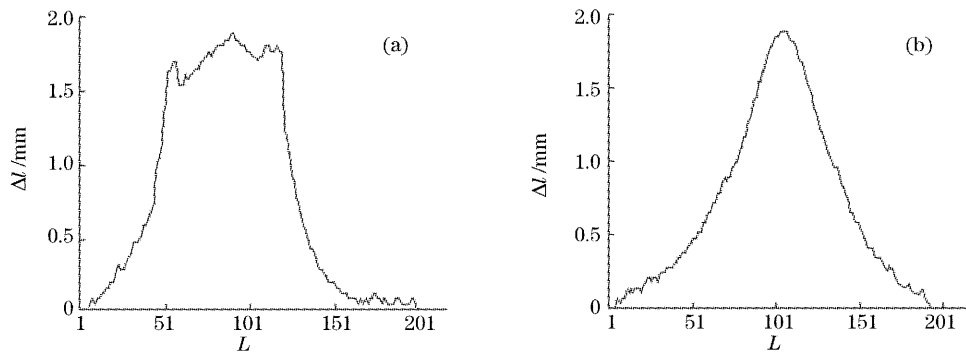


图 3 (a) 1° 和 (b) 118° 方向上条纹偏移量

Fig. 3 Shifting of the fringe at (a) 1° and (b) 118°

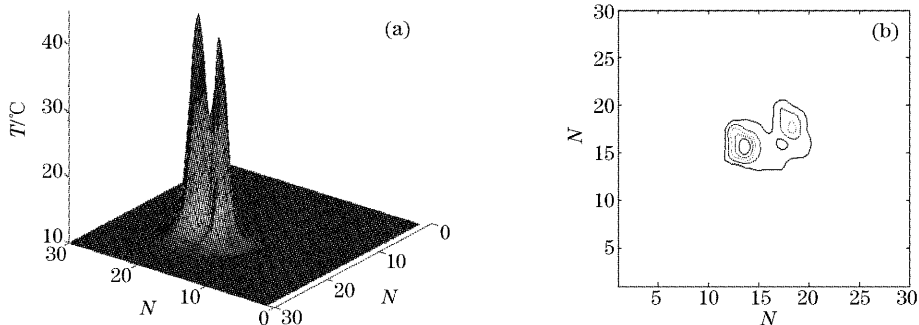


图 4 全场采样重建结果。(a) 重建截面的温度三维分布, (b) 重建截面的等温曲线

Fig. 4 Reconstruction results of full range sampling. (a) three-dimensional temperature distribution of the reconstructed cross section, (b) temperature topography of the reconstructed cross section

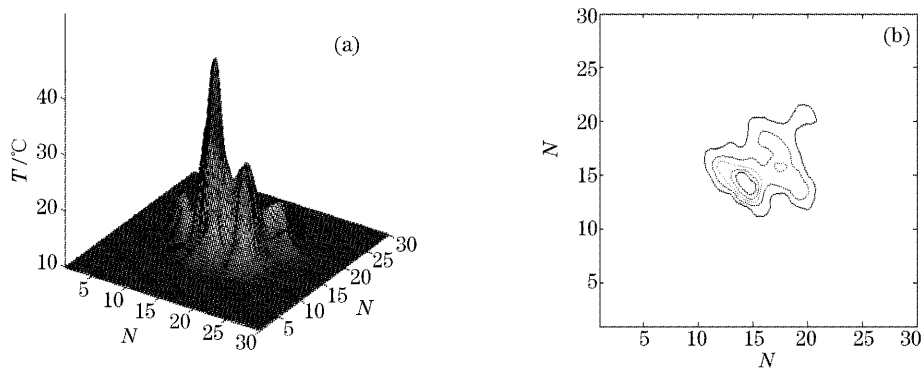


图 5 正交投影采样重建结果。(a) 重建截面的温度三维分布, (b) 重建截面的等温曲线

Fig. 5 Reconstruction results of orthogonal projection sampling. (a) three-dimensional temperature distribution of the reconstructed cross section, (b) temperature topography of the reconstructed cross section

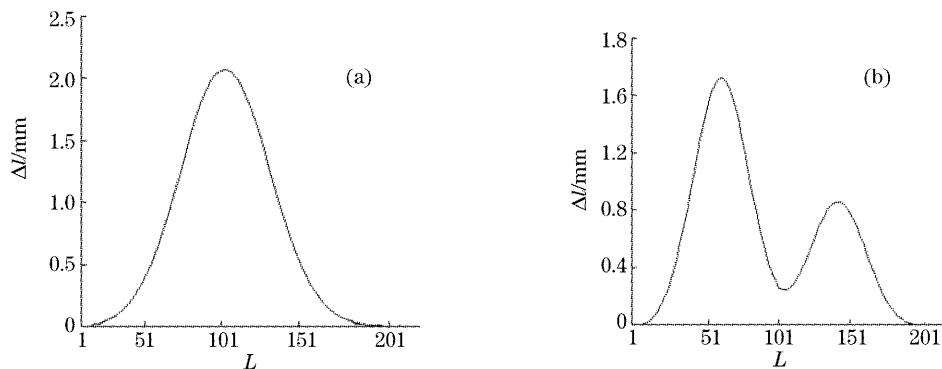


图 6 虚拟实验干涉图中(a)90°与(b)150°方向的条纹偏移量

Fig. 6 Shifting of the fringes in the virtual experimental interferograms at (a) 90° and (b) 150°

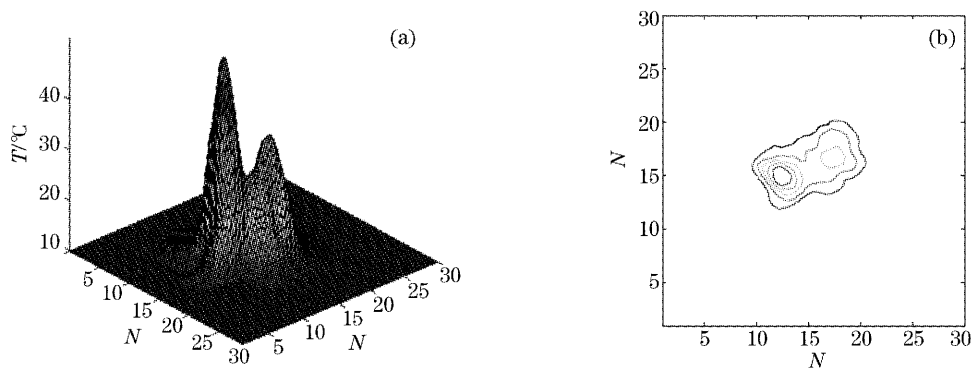


图 7 虚拟实验与真实实验相融合的重建结果。(a) 重建截面的温度三维分布图, (b) 重建截面的等温曲线

Fig. 7 Reconstruction results with the fusion of virtual and real experiments. (a) Three-dimensional temperature distribution of the reconstructed cross section, (b) temperature topography of the reconstructed cross section

比较图 4、图 5 和图 7 的重建结果可以看出,与全场采样重建结果相比,尽管采用了虚拟实验和真实实验相融合的三维层析重建,在采用正交小角度投影采样重建时,由于仅仅选取了全场中 60°范围内的投影数据,因此重建温度场的分布与全场采样重建结果所反映的温度场的分布有明显的偏差,也

就是说,采用正交小角度采样重建的温度场分辨率低;由图 7 所示的全场范围采样的虚拟实验与真实实验相融合的三维层析重建结果可以看出,重建出的温度场的分布更趋近于全场采样的重建结果,它们的双峰误差小于 5%,这表明全场范围采样的虚拟实验与真实实验相融合的三维层析提高了重建温

度场的分辨率,与客观实际温度场的分布更吻合。

参 考 文 献

- 1 H. M. Hertz. Experimental determination of 2-D flame temperature fields by interferometric tomography [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **54**(3):131~136
- 2 C. Soller, R. Wenskus, P. Middendorf *et al.*. Interferometric tomography for flow visualization of density fields in supersonic jets and connective flow[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2921~2932
- 3 Yao Wei, Li Zhenhua, He Anzhi. Algebraic tomography fused with pointwise measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 556~559 (in Chinese)
姚 卫,李振华,贺安之. 融合点测量信息的光学层析方法[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 556~559
- 4 Allan T. Dolovich, G. M. L. Gladwell. Generalized iterative approach to curved-ray tomography [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1992, **17**(3~5): 147~165
- 5 F. Natter. *The Mathematics of Computerized Tomography* [M]. New York: Wiley, 1986. 158~179
- 6 Wang Zhendong, Shi Mingquan, Li Zhenhua *et al.*. Three-dimensional flow field reconstruction based on parallel projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 556~559 (in Chinese)
王振东,石明全,李振华等. 基于平行投影法的三维流场重建[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 556~559
- 7 Yao Hongbing, He Anzhi. Improvement of the reconstruction algorithm of optical computerized tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 158~161 (in Chinese)
姚红兵,贺安之. 光学层析重建算法改进的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 158~161
- 8 A. G. Havener, L. A. Obergefell. Computational interferometric description of nested flow fields[J]. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(3): 441~445
- 9 Wu Yingchuan, Le Jialing, He Anzhi. Colored CFI interferometry in experimental interferogram processing for hypersonic blunted cone flow in ballistic range[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2002, **16**(1): 80~86 (in Chinese)
吴颖川,乐嘉陵,贺安之. 彩色计算干涉技术及应用[J]. *流体力学实验与测量*, 2002, **16**(1): 80~86