

计算流体成像技术重构方法及其应用

陈 勇 郭隆德 岳茂雄 陈志强

(中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要 建立系统的计算流体成像(CFI)技术,并论证其为流动数值模拟与风洞实验相互佐证的重要手段。采用纯数值模拟技术重构得到流场计算阴影、纹影以及干涉图,主要技术包括复杂湍流模拟技术、三线性插值技术和流动图像重构技术等。同时将 CFI 技术应用于激波管内绕障碍物三维复杂流动计算图像重构,并与双向全息实验结果进行了比较分析。研究证明该 CFI 技术可以用于复杂几何边界、分区域、非定常流动图像重构,不仅能够为流场结构特征分析提供重要参考依据,而且能够用于数值模拟与风洞实验结果的比较印证。

关键词 大气光学;计算流体成像;湍流模拟;三维流动;复杂几何边界

中图分类号 V211; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0701001

Reconstruction Methods and Application of Computational Fluid Imaging Technology

Chen Yong Guo Longde Yue Maoxiong Chen Zhiqiang

(Facility Design and Instrumentation Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract Computational fluid imaging (CFI) technology is an excellent tool for comparing numerical simulations with wind tunnel experiments of flow. Key methods including reconstruct computational fluid shadowgraph, schlieren and interferogram with numerical simulation technologies. Complex turbulence simulation, trilinear interpolation and flow image reconstruction etc. are developed. CFI technology is used for computational images reconstruction of the three-dimensional complex flow around an obstacle in the shock tube, and results are compared with those from bidirectional holographic experiments. It is shown that CFI can be used in reconstructing patterns of flows with complex geometric boundaries, the zonal area and unsteady characteristics etc., and it may be adopted not only for analyzing flowfield structures, but also for comparing numerical simulations with wind tunnel experimental results.

Key words atmospheric optics; computational fluid imaging; turbulence simulation; three-dimensional flow; complex geometric boundary

OCIS codes 030.7060; 100.2000; 260.2710; 330.7326

1 引 言

计算流体成像(CFI)技术采用纯数值模拟方法,通过获取流场干涉图、纹影图和阴影图等,为实验结果提供参考或论据,并为流场结构特征分析提供直观可视化的信息^[1~8]。该技术易于人为控制,如调节区域大小、控制条纹疏密程度、锐化或平滑图像和搭配颜色等,同时不受实验环境因素如洞壁、玻璃窗、仪器仪表和振荡等干扰而降低图像质量,因此

与实验方法相比,该技术是一种获取流场图像经济、便捷的手段。此外,CFI 技术可以作为计算流体力学(CFD)技术与风洞实验方法相互佐证的工具。CFI 技术和实验光学显示方法是获得流场图像的完全不同的途径,二者相比较更具说服力,也更能印证 CFD 技术与风洞实验方法的有效性及其流场结果的准确性等。

CFI 技术发展于 20 世纪 70 年代,但直到 20 世

收稿日期: 2011-11-07; 收到修改稿日期: 2012-02-20

作者简介: 陈 勇(1975—),男,博士,副研究员,主要从事湍流模型、湍流计算和气动光学等方面的研究。

E-mail: cardchey@sina.com

纪 90 年代因为计算机性能的提高和 CFD 技术日臻完善,国外文献中才出现较为清晰的计算流动图像^[1~4]。在国内最早从事 CFI 技术研究的团队是以乐嘉陵等^[5~8]为代表的研究群体,他们于本世纪初发展 CFI 技术,并成功编制了计算流动图像可视化软件平台。上述研究工作带动了 CFI 技术的高速发展,并将 CFI 技术成功运用于流动数值模拟与风洞实验之间的比较论证。在这些研究中,更多的是针对规则边界二维流动干涉图像进行重构,而对于三维复杂几何轮廓边界流动图像的重构效果有待加强。本文在此基础上,引入脱体涡模拟(DES)方法^[9,10]耦合 Jin-Braza(J-B)模型^[11]模拟湍流的技术、三线性插值耦合距离加权插值用于数据信息交换的技术、复杂几何轮廓流动边界拟合与分区重构技术等,发展并建立系统的 CFI 技术,有效改进了

CFI 技术图像重构功能和其在工程中的应用能力,使之成为流动数值模拟结果可视化、流场结构特征分析和数值与风洞实验对比印证的重要手段。

2 复杂湍流流场数值模拟技术

湍流主要采用 DES 方法模拟。DES 方法是雷诺平均(RANS)与大涡模拟(LES)的混合方法,借用 RANS 和 LES 的思想,综合二者的优越性能,依靠开关函数控制不同方法的转换与调用,即在近壁区采用 RANS 方法,在远离壁面的自由来流中采用 LES 方法。DES 方法较 RANS 方法更为准确,而相比于 LES 方法使用更少的计算量获取较高精度计算结果^[10]。基于 Menter 的两方程 $k-\omega$ 切应力输运(SST)模型,DES 方法的具体形式为^[9,10]

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dk}{Dt} &= P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \frac{M_\infty}{Re} \\ \rho \frac{D\omega}{Dt} &= \frac{\gamma \rho \tau_{ij}^t}{\mu_t} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{M_\infty}{Re} - \beta \omega^2 \frac{Re}{M_\infty} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \frac{M_\infty}{Re} + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{M_\infty}{Re}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 M_∞ 、 Re 分别是以来流参数定义的马赫数、雷诺数,而 σ_k 、 σ_ω 、 $\sigma_{\omega 2}$ 和 β 等是湍流模型常数, k 为湍动能。湍流涡粘性系数为

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{\Omega F_2} \frac{Re}{M_\infty} \right], \quad (2)$$

式中 Ω 为平均流场的涡量, F_2 为中间过程函数,湍流涡的尺度由控制函数决定:

$$\begin{cases} \bar{l} = \min(l_{k-\omega}, C_{DES} \Delta) \\ l_{k-\omega} = \frac{M_\infty}{Re} \frac{k^{1/2}}{C_\mu [1 + \alpha_1 M_t^2 (1 - F_1)] \omega}, \\ \Delta = \frac{1}{L} \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \end{cases} \quad (3)$$

式中 C_μ 为湍流模型常数, M_t 为当地湍流马赫数, F_1 为中间过程函数。上述控制函数能够实现流场的自动分区和湍流模型的自动调用,即在 RANS 区 \bar{l} 成为 $l_{k-\omega}$,由 $k-\omega$ SST 模型决定,而在 LES 区, $k-\omega$ SST 模型转换为 LES 的 Smagorinsky 型亚格子应力模型。控制函数可能导致湍流涡粘性在 RANS 区与 LES 区边界过渡不连续光滑,并因控制函数与网格单元尺度紧密相关,因此网格疏密程度也会影响分区的准确性等。

本文发展了 DES 方法与 J-B 模型相耦合的求解技术,即在湍动能控制方程中引入 J-B 模型的湍动能生成项形式^[11]。通常,湍动能生成项由流场形变量

决定,而在 J-B 模型中则由平均流场的涡量决定

$$P_k = \mu_t \Omega^2 \frac{M_\infty}{Re}. \quad (4)$$

J-B 模型主要基于湍流内在作用机理构建,认为大尺度含能涡通过破碎、分裂产生小尺度涡,小尺度涡转化为分子热能把湍流能量逐渐耗散掉,由此把湍动能生成与平均流场涡量紧密联系起来。大量工程应用证明,J-B 模型在湍流绕流数值模拟中能够更好地量化湍流输运量,尤其对前驻点的湍动能预估较为准确。

3 数据信息交换技术

本文中的 CFI 技术是根据光程差发展的,即由 CFD 流场计算结果得到光波穿过流场后的光程差。计算光程差需要在流场与光场之间进行数据信息转换,采用三线性插值和距离加权平均插值技术实现。如图 1 所示的网格单元,已知单元的 8 个顶点的函数值是 φ_i ,利用三线性插值公式获取单元内部一点 P 的函数值 φ_P 时,三线性插值公式可以表示为

$$\begin{aligned} \varphi_P &= a_1 + a_2 \xi + a_3 \eta + a_4 \zeta + a_5 \xi \eta + a_6 \xi \zeta + a_7 \eta \zeta + \\ & a_8 \xi \eta \zeta, \quad 0 \leq \xi, \eta, \zeta \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中系数 $a_1 \sim a_8$ 取决于单元 8 个顶点的坐标和函数值。采用三线性插值得到单元内部点 P 的函数值

的具体步骤是:1)由单元8个顶点函数值 φ_i 及坐标 (x_i, y_i, z_i) 得到各自对应系数 $a_1 \sim a_8$ 等;2)用牛顿迭代法求解方程组,获得 (x, y, z) 对应的曲线坐标值 (ξ, η, ζ) ;3)把 (ξ, η, ζ) 和系数 a_i 代入(5)式中,插值得到点 P 的函数值 φ_P 。

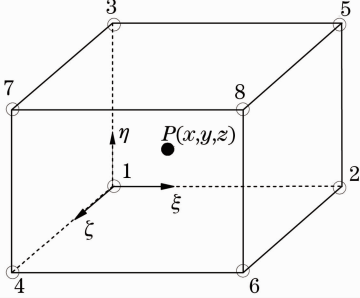


图1 插值示意图

Fig.1 Sketch of interpolation

三线性插值方法需要迭代求解,计算量大,在网格质量不高或扭曲变形严重时迭代求解可能发散,从而导致无法正常获取 P 点的函数值。为此,本文在三线性插值技术基础上,同时耦合计算量小、稳健性强的距离加权平均插值计算方法。仍以图1为例,设点 P 到8个角点 (x_i, y_i, z_i) 的距离为 r_i ,则距离加权平均插值方法能够用下式表示为(其中 ϵ 是一个小参数,取为 $\epsilon = 10^{-30}$)

$$\varphi_P = \frac{\sum_i \frac{\varphi_i}{r_i + \epsilon}}{\sum_i \frac{1}{r_i + \epsilon}},$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}. \quad (6)$$

4 流动图像重构技术

当光波通过流场时,非均匀流场使光波波前发生畸变,从而带来气动光学效应影响^[12~14]。在CFD数值模拟结果的基础上,利用三线性插值技术和距离加权平均方法获得在光束传输通道上的密度分布,根据光波传输理论沿着传输路径累积分得到波前畸变光程差:

$$\Delta_{\text{OPD}}(x, y) = \int_0^{L_0} [n(x, y, z) - 1] dz - \Delta_{\text{OPL}}, \quad (7)$$

式中 z 轴是光波传播方向, L_0 为在流场中的传输距离,而 Δ_{OPL} 是在空间上的平均光程。由实验阴影、纹影与干涉成像原理,基于光程差及其一阶、二阶导数,发展阴影、黑白纹影、红绿黄蓝四彩色纹影和干涉重构技术。在流动图像重构中,耦合高斯函数滤波或均值滤波技术,平滑图像或过滤可能的数值振荡,并编制软件模块用于复杂几何流场边界拟合、区域投影等。

4.1 阴影重构技术

阴影法反映流场密度二阶导数变化,而光程差表征流场密度变化沿传输路径的累积效应,因此,光程差的二阶导数能够用于流场阴影图像重构

$$\frac{\Delta I}{I} \propto \left[\frac{\partial^2 \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial y^2} \right]. \quad (8)$$

4.2 黑白纹影重构技术

纹影反映流场密度的一阶导数变化,因此利用光程差沿 x 向或 y 向的一阶导数能够重构沿不同刀口方向的黑白纹影图像

$$\begin{cases} \Delta I/I|_x \propto \partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y) / \partial x \\ \Delta I/I|_y \propto \partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y) / \partial y \end{cases} \quad (9)$$

4.3 干涉重构技术

当单位振幅初始平面光波通过流场时,因流动发生波前相位改变后形成物光波 $A(x, y)$,与带有 x 向、 y 向倾斜的参考光波 $U_r(x, y)$ 合成相干,则干涉条纹强度分布可以表达为

$$\begin{aligned} \Delta I/I &\propto [A(x, y) + A_r(x, y)] \cdot \\ &[A(x, y) + A_r(x, y)]^* \propto \\ &AA^* + A_r A_r^* + AA_r^* + A^* A_r \propto \\ &2 + 2\cos\{k[\alpha x + \beta y - \Delta_{\text{OPD}}(x, y)]\}, \\ A(x, y) &= \exp[ik \cdot \Delta_{\text{OPD}}(x, y)], \\ A_r(x, y) &= \exp[ik \cdot (\alpha x + \beta y)], \end{aligned} \quad (10)$$

式中 α 和 β 是参考光波分别沿 x 向、 y 向的倾斜角度。参数 α 与 β 能够用于控制条纹疏密程度、干涉条纹走向、有限与无限干涉之间的转换等,因此计算干涉技术较风洞实验流动光学干涉技术更灵活、简捷和实用。

4.4 红绿黄蓝四彩色纹影重构技术

彩色纹影图像同时反映 x 向与 y 向流场密度一阶导数变化,比显示灰度变化的黑白纹影有更高的色彩灵敏度,它可以包含更多的流场内部信息,能够更形象直观地反映流场结构特征变化。彩色纹影技术图像重构的原理是:利用光程差的正负 x 向导数反映红绿颜色亮度变化,而正负 y 向导数反映黄蓝颜色亮度变化,最后根据三色原理计算每个像素点的红绿蓝(RGB)值

$$\begin{aligned} \text{Red:} \quad \frac{\Delta I}{I} &\propto + \frac{\partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial x}, \\ \text{Yellow:} \quad \frac{\Delta I}{I} &\propto + \frac{\partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial y}, \\ \text{Green:} \quad \frac{\Delta I}{I} &\propto - \frac{\partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial x}, \\ \text{Blue:} \quad \frac{\Delta I}{I} &\propto - \frac{\partial \Delta_{\text{OPD}}(x, y)}{\partial y}, \end{aligned}$$

$$RGB(C) = R(R+Y) + G(G+Y) + B(B). \quad (11)$$

在阴影或纹影图像重构中,某像素点的光程差一阶或二阶导数需要用到邻近多个像素点值,因此在区域边界上需要进行特殊处理,依靠内插或外插方法获取区域外虚拟像素点上的光程差。在不同区域对接内边界上,采用内插或外插方法是不恰当的,因为这些方法难以保证图像光滑过度或消除边界痕迹。因此,本文借用 CFD 内边界处理技术用于分区区域图像的边界信息传递,编制软件模块实现区域内边界的自动化处理。

5 CFI 技术的应用分析

将 CFI 技术用于激波管流动图像重构。中国空气动力研究与发展中心(CARDC)的激波管实验段尺寸 $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 、激波马赫数 $M_s = 1.447$ 、波

前压力 1 atm 和温度 283.15 K 。实验模型是半钝锥体+立方体模型,模型尺寸如图 2 所示,其中半钝锥体头部球体半径 $R = 4 \text{ mm}$ 、底部直径 28.4 mm 、长度 30 mm ,立方体模型位于半钝锥体之后 $S = 27 \text{ mm}$ 处,其棱长为 12 mm 。流动方向从左向右,实验采用双向全息技术瞬态获取在俯视方向及侧向上的流场全息干涉图,工作激光为红宝石激光,波长 $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$ 。流场数值模拟采用求解全 Navier-Stokes 方程组,其中利用 DES 方法^[9,10]耦合 J-B 模型^[11]模拟湍流,利用双时间步 LU-SGS 方法追踪运动激波的非定常过程,利用矢量通量分裂格式^[15]离散对流项,最后利用 CFI 技术基于流场结果分区重构获取流场计算阴影、纹影以及干涉图等,并通过对比计算与实验的干涉图以分析论证 CFI 技术的可行性及其结果的准确性等。

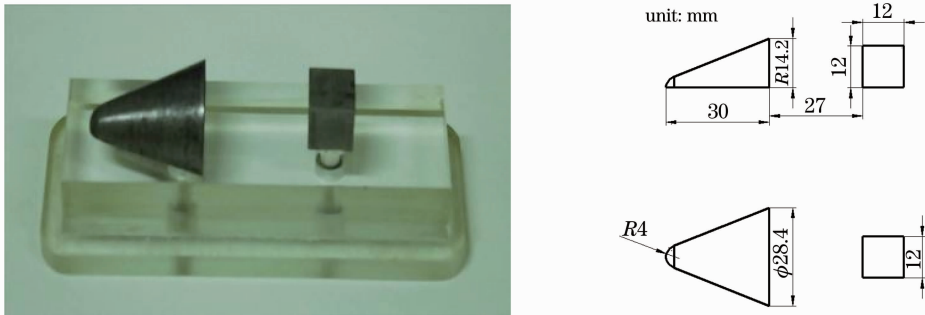


图 2 实验模型及其尺寸

Fig. 2 Experimental model and size

图 3 和图 4 给出了在三个不同时刻的计算阴影图和四彩色纹影图。在图中运动正激波穿过半钝锥体时发生绕射,两侧绕射激波与正激波之间产生干涉,而激波遇到立方体时还会引起反射,最后形成一系列相互干扰的复杂波系。气体在激波扫过后会跟随激波一起运动,而运动气体在摩擦、对流以及激波

共同作用下,形成附面层、分离旋涡和剪切层等复杂流场结构。计算阴影和彩色纹影均很好地反映了激波的发展变化过程,尤其后者有较高色彩灵敏度,更能够显示在半钝锥体与立方体之间较丰富的流场结构特征,例如在图中 A 点,彩色纹影更好地反映了旋涡与激波的相互干扰影响。

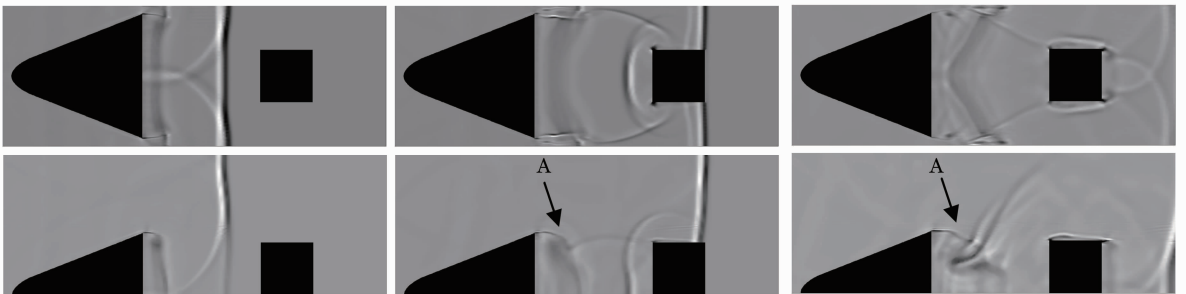


图 3 计算阴影图

Fig. 3 Computational shadowgraph

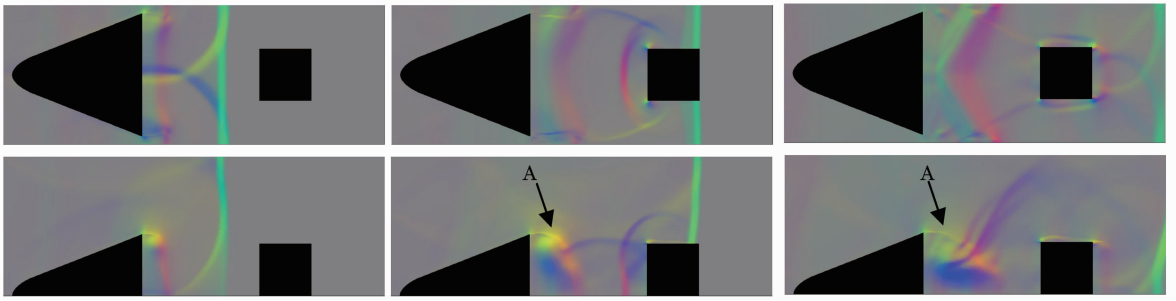


图 4 计算彩色纹影图

Fig. 4 Computational colorful schlieren

图 5 和图 6 给出了俯视与侧视方向的计算与实验无限干涉图(计算干涉图的参考光倾斜角度 $\alpha=0^\circ$ 和 $\beta=0^\circ$),图中空间无限条纹级数定量地反映了流场密度变化情况。干涉图表明,计算与实验均很好地捕捉了激波绕过障碍物的变化、激波的相互干涉、反射激波的发展以及分离旋涡流动等,同时,计算与实验干涉图的无限干涉条纹级数近似相当,说明密度空间变化量值近似相同,因此,二者不仅从定性上

有很好的 consistency,而且在定量上也有较好的可比性。在 CFI 图像重构中,计算与实验采用相同的流场条件,即模型尺寸、激波马赫数 M_s 和波前气流参数等,除此之外,二者之间没有任何关联,是获取流动干涉图像的两种完全不同途径,因此,二者图像的一致性证明了 CFI 技术与实验光学显示技术的有效性及其结果的准确性。

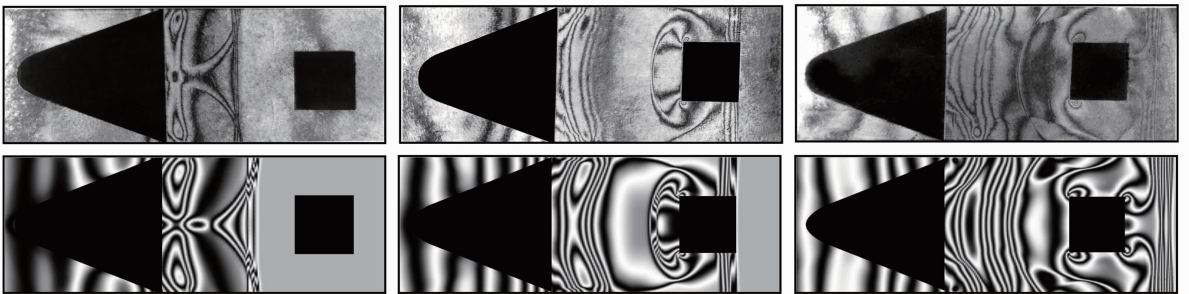


图 5 计算与实验干涉图比较(俯视)

Fig. 5 Comparison between computational and experimental interferograms (top view)

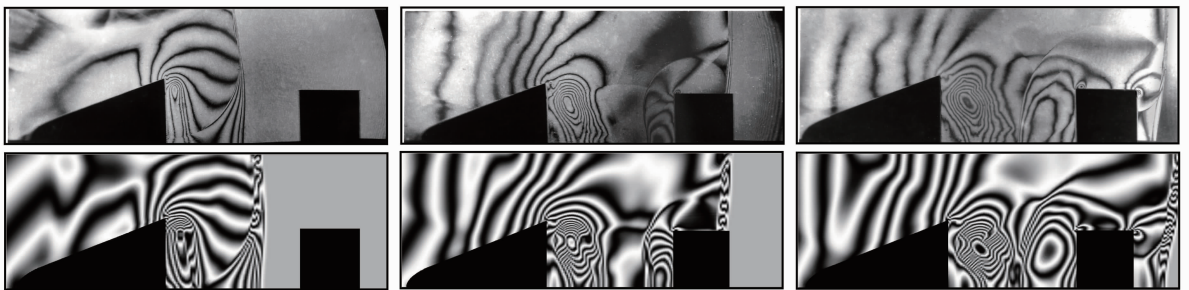


图 6 计算与实验干涉图比较(侧视)

Fig. 6 Comparison between computational and experimental interferograms (side view)

6 结 论

介绍了 CFI 技术的重构方法及其在工程中的应用,描述了 CFI 技术的湍流模拟方法、数据信息的传递技术和光程差计算方法,并根据风洞实验流场光学成像原理,给出了利用光程差及其一阶、二阶

导数,重构流动计算阴影、黑白/四彩色纹影、干涉图像的具体方法。最后,利用 CFI 技术软件平台重构了在激波管中绕障碍物流场的图像,并与相同流场条件的双向全息实验结果进行了比较分析。结果表明本文的 CFI 技术获取的重构图像能够恰当反应复杂流场微细结构特征,并能够据此直观分析流场

结构内部的丰富信息;计算与实验干涉图吻合较好,二者不仅从定性上一致地捕捉了流场运动正激波、绕射激波、反射激波、分离旋涡以及剪切层等流场复杂结构,而且从定量上根据无限干涉条纹级数反映的流场空间密度变化量值近似相同。CFI技术与风洞实验流动光学显示技术是获取流动图像的两种不同方法,因此,CFI技术除在流场结构特征分析方面有独特优势之外,其在CFD与风洞实验结果相互对比论证方面也有重要优势,在论证两种方法的有效性及其结果的准确性方面有着不可替代的作用。

参 考 文 献

- 1 W. T. Strike, J. E. O. Hare, W. L. Templeton. Development of Holographic Interferometric Applications in the VKF Supersonic and Hypersonic Wind Tunnels [M]. Font Beloir: Defense Technical Information Center, 1974
- 2 L. A. Yates. Images Constructed from Computed Flowfields [R]. 1992, AIAA92-4030
- 3 B. Peters, D. Brown, T. Cole *et al.*. CFI-Aero-Optic-Images: Issues for Wave Optics Modeling [R]. 1994, AIAA94-2622
- 4 Holger Babinsky, Jiming Yang, Kazuyoshi Takayama. Animated visualization of shock wave flowfields for dynamic comparison between experimental and computational prediction [C]. *SPIE*, 1994, **2410**: 101~107
- 5 Le Jialing, Wu Yingchuan, Ni Hongli *et al.*. Computational interferometry for three-dimensional flow [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2001, **15**(2): 1~9
乐嘉陵, 吴颖川, 倪鸿礼等. 三维流场的计算干涉方法 [J]. *流体力学实验与测量*, 2001, **15**(2): 1~9
- 6 Wu Yingchuan, Le Jialing, He Anzhi. Computational flow imaging of axis-symmetric flow [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 721~725
吴颖川, 乐嘉陵, 贺安之. 轴对称流场的计算流动显示算法 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 721~725
- 7 He Anzhi, Yao Hongbing, Wu Yingchuan *et al.*. Color coding of computational interference for holographic interferogram in complex flow field [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(3): 348~351
贺安之, 姚红兵, 吴颖川等. 复杂流场全息干涉图的计算干涉编码处理 [J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(3): 348~351
- 8 Yao Hongbing, He Anzhi, Wu Yingchuan *et al.*. Three-dimensional tomography of incomplete data with fusion of virtual and real experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 479~484
姚红兵, 贺安之, 吴颖川等. 虚拟和真实实验相融合的三维非完全数据层析 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 479~484
- 9 F. R. Menter. Improved Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows [R]. 1993, AIAA93-22809
- 10 N. W. Scott, Earl P. N. Duque. Using Detached Eddy Simulation and Overset Grids to Predict Flow Around a 6:1 Prolate Spheroid [R]. 2005, AIAA2005-1362
- 11 G. Jin, M. Braza. Two-equation turbulence model for unsteady separated flows around airfoils [J]. *AIAA J.*, 1994, **32**(11): 2316~2320
- 12 E. J. Jumper. Recent Advances in the Measurement and Analysis of Dynamic Aero-Optic Interactions [R]. 1997, AIAA97-2350
- 13 Li Guichun. Aero-Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006
李桂春. 气动光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
- 14 Chen Yong, Guo Longde, Zhang Long *et al.*. Simulation and study about thermal blooming of high power laser affected by the convective wind [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1569~1573
陈勇, 郭隆德, 张龙等. 对流风作用下的强激光热晕效应数值模拟研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1569~1573
- 15 David L. Whitfield, J. Mark Janus. Three-Dimensional Unsteady Euler Equations Solution Using Flux Vector Splitting [R]. 1984, AIAA84-1552

栏目编辑: 李文喆