

# 彩虹纹影技术在超声速自由射流密度场定量测量中的应用

蒋冠雷<sup>1</sup> 洪延姬<sup>2</sup> 叶继飞<sup>2</sup> 吴文堂<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京 101416; <sup>2</sup> 装备指挥技术学院基础部, 北京 101416)

**摘要** 彩虹纹影定量测量技术作为一种光学非侵流场定量测量技术在诸多典型流场的定量测量中有着广阔的应用前景,可用于定量测量流场的密度梯度和密度场。以轴对称自由射流为研究对象,采用典型的“Z”字形纹影光路布局,使用氙灯连续光源,并用一维渐变彩虹滤光片代替普通刀口,进行了彩虹纹影定量测量实验;给出了彩虹纹影定量测量中的滤光片制作、标定及图像数据处理过程。使用数值计算对实验的设定情况进行了仿真,结果比较一致。

**关键词** 测量;定量测量;彩虹滤光片;彩虹纹影;Abel变换;数仿真

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s108004

## Application of the Rainbow Schlieren in the Density Quantitative Measurement of the Supersonic Freejet

Jiang Guanlei<sup>1</sup> Hong Yanji<sup>2</sup> Ye Jifei<sup>2</sup> Wu Wentang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China

<sup>2</sup> Department of Basic Theories, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China

**Abstract** The rainbow schlieren can be widely used in a lot of typical flow field as a non-invasive optical measurement. It can measure the density and density-grads quantitatively. The rainbow schlieren experiment takes the axis-symmetry free jet as a object, using the typical “Z” schlieren system and Xe-lamp, and replaces the edge with rainbow filter. The facture and calibration of rainbow filter, the quantitative measure theory, and the date processing are studied in detail. While the freejet of this experiment is simulated, and a accordant result is obtained. The technology supports a reference to the quantitative visual study of the flow measurement.

**Key words** measurement; quantitative measurements; rainbow filter; rainbow schlieren; Abel inversion; numerical simulation

**OCIS codes** 100.2000; 120.2440; 270.5585; 330.1710

## 1 引言

随着对非接触式流场定量测量需求的逐步增强,传统的流场定性显示和定量测量设备已很难满足需求。彩虹纹影定量测量技术作为一种光学非侵测量技术备受关注,其具有流场信息量大、非侵定量测量区域大、成本低等显著特点。其可以较准确地测量流场的密度场和密度梯度场,相比较传统的皮托密度管,彩虹纹影定量技术可以在不影响流场本身特性的前提下,满足密度场测量需求。

彩虹纹影定量测量的相关研究已被广泛应用于超声速自由射流密度场测量、膨胀波系密度场测量、火焰燃烧温度场测量等领域,日本<sup>[1,2]</sup>、美国<sup>[3-5]</sup>、荷兰<sup>[6-8]</sup>等国的学者都给出了较高精度的彩虹纹影定量测量结果。但对于彩虹纹影定量测量本身的研究尚不够系统全面,具体如滤光片的制作标定尚没有详细的文献介绍。本文介绍了一种基于典型的“Z”字形纹影布局的彩虹纹影定量测量系统,以超声速自由射流流场为典型研究对象,重点对滤光片的制

收稿日期: 2011-07-28; 收到修改稿日期: 2011-09-30

作者简介: 蒋冠雷(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学流场诊断方面的研究。E-mail: adolf.elwin.313@163.com

导师简介: 洪延姬(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与推进技术等方面的研究。

E-mail: hongyanji@vip.sina.com

作和标定,以及图像数据处理等方面展开了研究。同时使用 Fluent 进行数值计算,与测量所得结果进行了对比。

## 2 实验配置

图 1 为所使用的彩虹纹影定量测量系统的实物照片与配置简图,采用典型的“Z”字形纹影布局,光源和成像系统布置于平行光流场测试区的两侧,离轴角约  $5^\circ$ 。该系统包括:① 氙灯光源及透镜光阑组;② 冷喷射流及控制系统;③ 直径为 150 mm 纹影镜组;④ 直径为 100 mm 反射镜;⑤ 彩虹滤光片和成像系统,

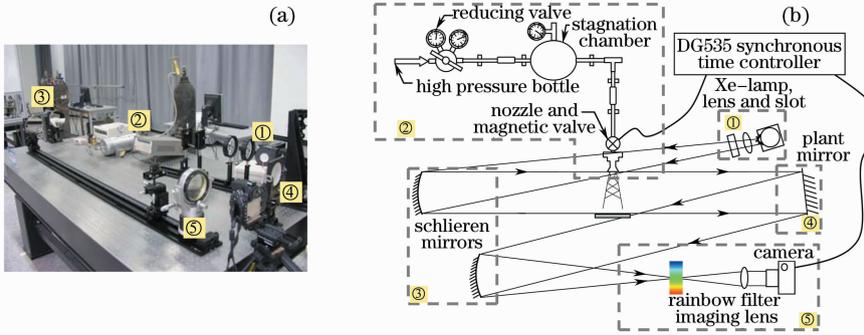


图 1 彩虹纹影定量测量系统实物照片(a)与配置简图(b)

Fig.1 Picture (a) and diagram (b) of the rainbow schlieren quantitative measurement system

## 3 测量原理及数据处理过程

光在变密度流场区域中传播时,密度改变导致折射率的变化,光束便产生了偏转。如图 2 所示,光束 1 为没有流场扰动时光路,其平行于光轴入射,经过薄透镜将会聚于像方焦点,彩虹滤光片即安装于该位置处。而光束 2 为有流场扰动时的光路,其与光束 1 之间的偏转角为  $\theta$ ,由薄透镜理论可知,光束 2 与光束 3 将会聚于像方焦平面上的某一点。该点与光轴间的距离为  $a$ 。在彩虹滤光片作用下,不同的偏移量  $a$  即可使得流场图像带有不同的颜色,其几何关系为

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{a}{f_{M2}} \quad (1)$$

美国学者 Settles 在文献[8]中给出了光传播方向、折射率  $n$  和偏转角  $\theta$  之间的关系

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2)$$

由 Gladstone-Dale(G-D)关系式可以得到密度场和折射率之间的关系

$$n = \frac{c^*}{c} = 1 + K\rho, \quad (3)$$

式中  $\rho$  为流场的密度; $K$  被称为 Gladstone-Dale 常

共 5 部分组成。其中,光源及透镜光阑组产生一束线光源,直径为 150 mm 的纹影镜焦距为 1.5 m,光源和彩虹滤光片的分别位与两面纹影镜的焦点上。高压气瓶中存贮的高压氮气,经减压器后存贮于气池中,其气压降至 2~3 MPa,可维持约 3 s 的准稳态射流。喷嘴为直径 6 mm 的直筒型喷嘴,可产生马赫数为 1~3 的欠膨胀自由射流。相机为尼康 D700 数码单反相机,可达到 4256 pixel×2832 pixel 的空间分辨率,1/8000 的曝光时间和每秒 12 张的连拍速度。通过使用改造了的相机快门线可以实现喷嘴电磁阀和相机受 DG535 时序控制器同步控制。

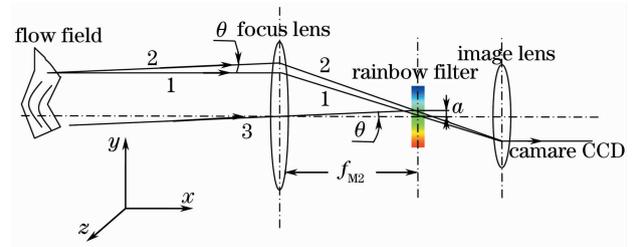


图 2 偏折角  $\theta$  与滤光片位移  $a$  关系图

Fig.2 Relationship between the deflect angle  $\theta$  and the displacement  $a$

数,其大小  $K = 2\pi\alpha$ ,  $\alpha$  为气体分子或原子的极化率。该参数取决于介质本身的性质和光的波长,也和介质的温度和压强弱相关。文献[9]中给出了  $K$  的参考值,可以发现  $K$  值很小,可以忽略,将(3)式代入(2)式后,可以简化为

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{1 + K\rho} \frac{\partial n}{\partial y} \approx \frac{\partial n}{\partial y} = K \frac{\partial \rho}{\partial y}, \quad (4)$$

由此,即可对(1)式和(4)式积分得到流场的密度值。

对于轴对称射流流场的测量,为了分析其密度场,利用轴对称射流的基本特性,可以首先把射流截面分为  $N$  个同心圆环,其半径为  $r_j$ ,则每个圆环上的密度相同,如图 3 所示。

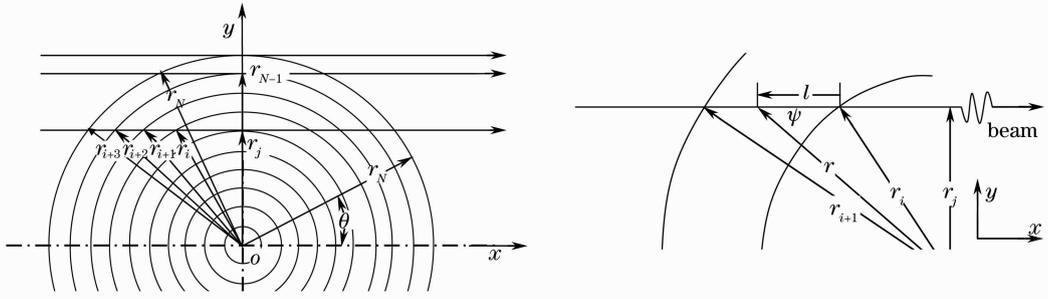


图3 流场截面几何关系简图

Fig. 3 Geometry relation of the flow field section

由图3的几何关系可知,在轴对称射流条件下,在极坐标下其密度只与半径大小有关而与角度无关,即有

$$l = \sqrt{r^2 - r_j^2} - \sqrt{r_i^2 - r_j^2}, dl = \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - r_j^2}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \sin \psi \frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{r_j}{r} \frac{\partial \rho}{\partial r}, \quad (6)$$

第一步先计算在某一层  $r_j$  上两个相邻同心圆环  $r_i$

到  $r_{i+1}$  之间的偏转角  $\Delta\theta_j$ , 利用(4)~(6)式积分

$$\Delta\theta_j = \int \frac{d\theta}{dx} dl = \int \frac{dn}{dy} dl = \int_{r_i}^{r_{i+1}} \left( K \frac{r_j}{r} \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) \left( \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - r_j^2}} \right), \quad (7)$$

(7)式为一个典型的 Abel 积分方程,积分变换后可得到密度梯度的表达式<sup>[10]</sup>

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right)_j = \frac{\theta_j}{2Kr_j \ln[(r_{j+1} + \sqrt{r_{j+1}^2 - r_j^2})/r_j]} - \frac{\sum_{i=j+1}^N (\partial \rho / \partial r)_i \ln[(r_{i+1} + \sqrt{r_{i+1}^2 - r_j^2})/(r_i + \sqrt{r_i^2 - r_j^2})]}{\ln[(r_{j+1} + \sqrt{r_{j+1}^2 - r_j^2})/r_j]}, \quad (8)$$

式中每层的偏转角  $\theta_j$  由(1)式得到,  $r_j$  为每层的半径,共  $N$  层。注意计算时由  $j = N - 1$  开始起步,由最外层向轴线中心处计算。得到每层的密度梯度之后,密度场公式可表示为

$$\rho_j = \rho_{j+1} - \left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right)_j (r_{j+1} - r_j). \quad (9)$$

#### 4 滤光片的制作与标定

如前文所述,彩虹纹影与普通纹影最大的不同就是其利用不同的颜色反映了光线通过流场区时密度不同而产生不同的偏转量,而黑白纹影则只能依靠亮度明暗变化来反映偏转量的大小。这意味着彩虹纹影的信息量和健壮性较普通纹影有很大的提

升,其不易受光源本身亮度变化和杂光干扰的影响。而彩虹滤光片的制作与标定则是决定彩虹纹影定量测量技术关键,也是其区别于普通纹影而能进行定量测量的关键。

实验中彩虹滤光片的制作过程是:首先使用 Matlab 设计好所需的滤光片样式。使用 Matlab 的好处在于,其可以很方便地改变所生成的滤光片的参数。在 Matlab 所使用的 HSV 色彩制式中,改变色度  $H$  变化规律可以设计出不同灵敏度和色域范围的滤光片,改变亮度  $S$  和对比度  $V$  则可以改变滤光片的相应参数,且相比较于仅仅依靠快门和光圈来调节,使用 Matlab 的设定是连续可定量的。图4为不同参数所生成的不同滤光片。其中  $k$  为中央主

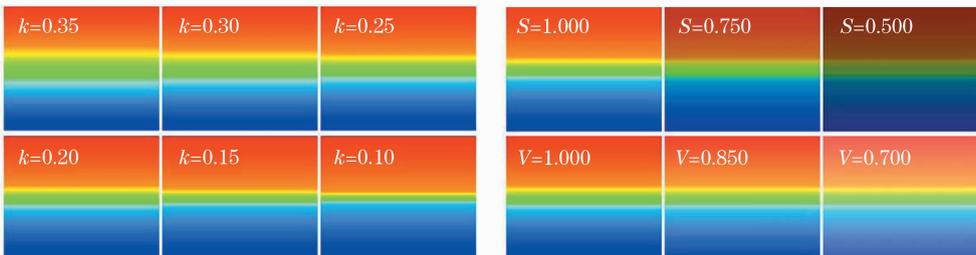


图4 不同参数所生成的滤光片示意图

Fig. 4 Diagram of the rainbow filter with different parameters

要色彩过渡区占全图高度的比例。图 5 则为对一副滤光片图像色度变化规律的说明,其中 2~5 区为中

央主要色彩过渡区,对测量精度和灵敏度的影响最大。

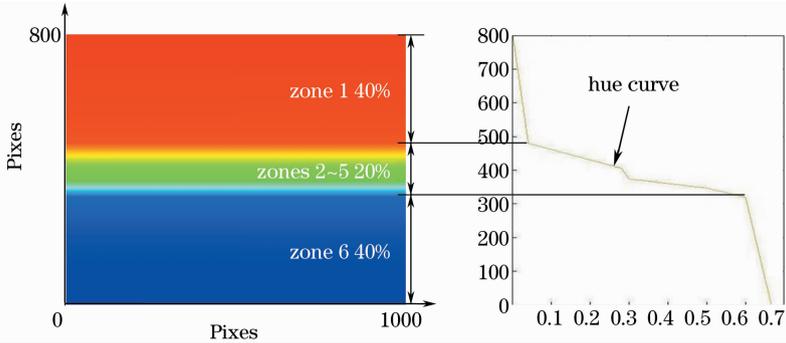


图 5 滤光片色度变化规律

Fig. 5 Change rule of the rainbow filter hue

使用 Matlab 生成滤光片图片之后,就需要使用胶卷相机将所设计的滤光片拍摄到胶卷底片上。胶卷为富士 Chrome Velvia RVP 50°反转片,反转片的特性在于胶卷底片冲洗出来以后,底片上的颜色为实际景物的颜色,这样就可以方便地制作滤光片并获得所希望的色彩;胶卷的感数值越低,颗粒越细腻,生成的滤光片灵敏度越高,但需要的曝光时间越长。图 6 为拍摄并冲洗后得到的滤光片胶卷底片及其安装方法。

方法是以滤光片的中央位置为零点,向两个方向都给定固定的偏转位移量,根据所获得图像的色度值进行曲线拟合。图 7 为给定偏移量后拍得的部分标定用图像组,以及依靠这些标定用图像的色度值进行的分段曲线拟合曲线图,由于实际操作中光束偏折角并不大,因此并不需要对整个滤光片进行标定。

在滤光片的制作过程中,受到图像亮度、对比度和环境因素的影响,其色彩并不能非常准确地按照预定的规律变化,因此在使用彩虹纹影进行定量测量前必须对所使用的滤光片进行标定。标定的具体

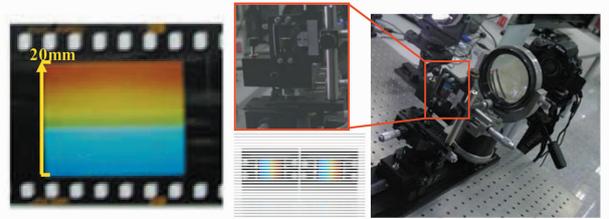


图 6 拍摄后得到的滤光片及其安装图

Fig. 6 Diagram of the rainbow filter photo and installation

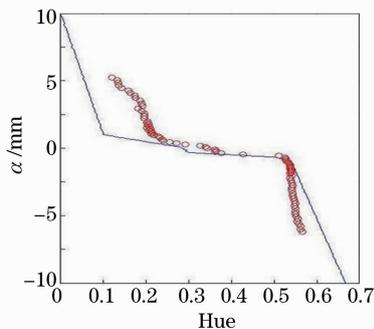
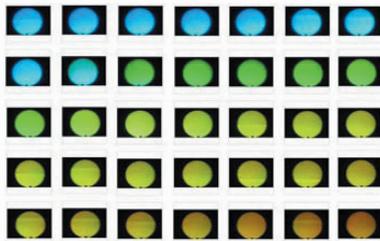


图 7 部分标定用图像及其标定图

Fig. 7 Part of the rainbow filter calibration map and calibration curve

## 5 典型实验与结果对比

本文中的实验为将贮气池中的气压加至 3 MPa 后进行的自由射流实验,达到准稳态时的气压约 1.5 MPa。在拍摄到流场图片后,使用 Matlab 进行数据处理,其流程为:1) 读取待处理的流场图片,确定 G-D 常数  $K$ ; 2) 由流场图片中每个像素的色度值

通过图 7 中的标定曲线得到偏转量  $a$ ; 3) 由偏转量  $a$  通过(1)式得到偏转角  $\theta$ ; 4) 通过(8)式得到密度梯度; 5) 通过(9)式得到密度场  $\rho$ ; 图 8 为流场图片及根据上述过程计算得到的偏转角和密度场,由于是轴对称射流流场,截取一半纹影图像进行分析,通过数据得到了该流场的密度场,从中能够定量了解

马赫盘前后的密度变化情况。同时给出了在 1.5 MPa 总压条件下,使用 Fluent 进行的数值仿真,并使用 Tecplot 进行可视化处理后的自由射流流场密度场结果。

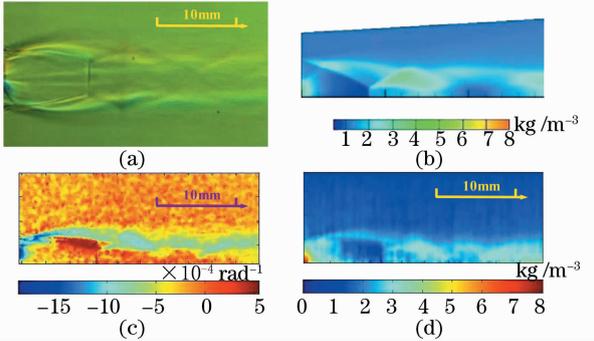


图 8 图像处理及结果对比图。(a)流场彩虹纹影照片;(b)数值计算得到的密度场图;(c)通过标定曲线得到的偏转角大小;(d)使用 Abel 变换计算得到的流场密度值图  
Fig. 8 Diagram of the picture processing and result comparison. (a) Flow field rainbow schlieren picture; (b) density calculated by numerical simulation; (c) deflection angle calculated from the calibration curve; (d) density calculated by the Abel inversion

## 6 结 论

彩虹纹影定量测量方法可以通过制作与标定彩虹滤光片以得到偏转量与颜色的对应关系,进而编写定量图像处理程序反演得到轴对称射流流场的定量密度场信息。通过与数值计算的比对,该方法基

本取得了较一致的结果,这表明彩虹纹影定量测量方法可以用于轴对称射流流场的密度场定量测量。

## 参 考 文 献

- 1 Yamamoto Hideki, Irie Masayuki, Miyazato Yoshiaki *et al.*. Application of rainbow schlieren deflectometry for axisymmetric supersonic jets[J]. *J. Thermal Science*, 2010, **19**(3): 218~221
- 2 Miyazato Yoshiaki, Irie Masayuki, Yamamoto Hideki *et al.*. Quantitative flow visualization of correctly expanded supersonic jets by rainbow schlieren deflectometry[C]. //AIAA/ASME/SAE/ASEE Inc. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: AIAA/ASME/SAE/ASEE Inc. 2010. 1218
- 3 P. S. Kolhe, A. Agrawal. Role of buoyancy on instabilities and structure of transitional gas jet diffusion flames [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2007, **79**(4): 343~360
- 4 T. Yep, A. Agrawal, D. Griffin. Gravitational effects on near-field flow structure of low-density gas jets[J]. *AIAA Journal*, 2003, **41**(10): 1973~1979
- 5 P. S. Kolhe, O. Ivanchenko, A. Agrawal *et al.*. Experimental measurement of density, pressure and temperature fields in a supersonic free jet using rainbow schlieren deflectometry[C]. //AIAA/ASME/SAE/ASEE Inc. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada: AIAA/ASME/SAE/ASEE Inc. 2008. 237
- 6 T. A. W. M. Lanen. Digital Holographic Interferometry in Compressible Flow Research [D]. Delft: Delft University of Technology, 1992. 19~37
- 7 G. E. Elsinga, B. W. Van Oudheusden, F. Scarano *et al.*. Assessment and application of quantitative schlieren methods with bi-directional sensitivity : CCS and BOS [C]. //PSFVIP. Proceedings of PSFVIP-4, Chamonix, France: PSFVIP, 2003. F4038
- 8 G. E. Elsinga. Density measurement by means of schlieren methods[R]. Delft: Delft University of Technology, 2003
- 9 G. S. Settles. Schlieren and Shadowgraph Techniques [M]. Berlin: Springer Press, 2001. 333~340
- 10 J. R. Greig, M. Raleigh. A quantitative schlieren system for measuring radial density profiles of reduced density channels in gases[R]. Washington D C: Naval Research Lab., 1981

栏目编辑:何卓铭