

基于投影式背景纹影技术的火焰温度场测量仪设计

张正贺, 黄贞, 陈汝婷, 薛晓惠, 严春晖, 黄恒烽, 李栋宇*

岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江 524048

摘要 基于空气折射率梯度测量的原理, 采用投影式背景纹影技术, 设计了非接触式火焰温度场测量仪。测量仪以半导体激光器作为光源, 采用 CCD 快速成像, 结合粒子图像速度场仪技术, 获取了图像上粒子的偏移量以量化偏折角。采用 Radon 变化求得折射率梯度, 利用空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程直接得出流场各区域的温度场, 采用反投影重建技术对火焰的不均匀温度流场进行了三维重构, 实现了火焰温度场的可视化测量。

关键词 传感器; 背景纹影技术; 投影式; 粒子图像速度场仪技术; 反投影重建; 火焰温度场

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.052803

Design of Flame Temperature Measurement Instrument Based on Projective Background-Oriented Schlieren Technique

Zhang Zhenghe, Huang Zhen, Chen Ruting, Xue Xiaohui, Yan Chunhui,
Huang Hengfeng, Li Dongyu*

School of Physics Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China

Abstract Based on the principle of air refractive gradient measurement, a non-contact flame temperature field measurement instrument is designed using the projective background-oriented schlieren technique. A laser diode is used as the light source. Based on the CCD fast imaging and the particle image velocimetry technique, the offset of particles in the photograph is obtained to quantify the deflection angle. The refractive index gradient is obtained by Radon transform. The temperature field in each region of the flow field is obtained directly using the nonlinear curve fitting equation of air refractive index to temperature. The three-dimensional non-uniform temperature field is reconstructed by the back-projection algorithm. Thus, the visualization of flame temperature measurement is achieved.

Key words sensors; background-oriented schlieren technique; projective; particle image velocimetry technique; back projection reconstruction; flame temperature field

OCIS codes 280.6780; 120.0280; 110.6820

1 引言

火焰温度场测量是燃烧领域极其重要的问题, 对于燃烧状态的判断、预测和诊断有着十分重要的意义。通过非接触式手段实现准确、实时、快速测量火焰温度场, 在工业、军事、航天航空等领域应用广泛。火焰温度场测量方法的研究一直是国内外燃烧领域的热点问题。非接触式测温方法分为两类: 一

是通过测量燃烧介质的热力学性质参数求解温度, 如声学法^[1-2]; 二是利用高温火焰的辐射特性通过光学法来测量温度场, 如谱线反转法^[3]、光谱测温技术^[4-5]、红外辐射测温^[6-7]、全息干涉测量法^[8]等。其中, 光学测温法因其能够实现温度的长时间测量及分布式、无干扰的在线测量, 成为现今测温方法的研究热点。纹影法就是一种用于流场显示和测量的常见方法, 能够实现气流的可视化以及火焰温度的非

收稿日期: 2018-09-30; 修回日期: 2018-11-08; 录用日期: 2018-11-23

基金项目: 广东省科技计划(2016A040403124)、湛江市科技计划(2017A02024)、岭南师范学院高等教育教学改革项目(LSJG024)

* E-mail: zzhuangzhen@163.com

接触式测量,被广泛应用于观察流场状态^[9-10]的定性研究^[11]。

随着人们对温度场定量测量需求的逐步增强以及现代数字图像技术的快速发展,纹影技术常作为火焰温度场测量实验中的定量分析手段。背景纹影系统设置简单、使用灵活、成本较低、可以获得流场两个方向上的偏转角信息,以及容易量化,已广泛应用于国内外研究中^[12]。如 Kurihara 等^[13-16,2]对火焰图像处理技术与方法进行了深入研究;周昊等^[17]研究了背景纹影技术在火焰温度场测量中的应用,发现所得的温度场符合实际情况。但总的来看,在火焰等复杂流体中的应用研究相对较少,难以满足应用需要。传统方法均通过 Gladstone-Dale 公式,利用气体折射率与气体密度之间的关系获得气体密度变化,再通过等压气体状态方程,利用气体密度与温度之间的比例关系,最终获得火焰温度场。该方法过程较为复杂。

综上所述,有必要分析和探讨背景纹影量化技术在火焰研究中的可行性及准确性。本文基于背景纹影技术,结合光学元件,设计一种非接触式便携的投影式纹影仪,可将纹影图像实时可视化,简化了普通背景纹影系统需通过繁琐的计算机图像处理才能显示纹影效果,实现了基于背景纹影技术的投影式纹影可视化。实验通过点燃的蜡烛模拟小型温度变化流场,采用 CCD 快速成像,并结合粒子图像速度场仪(PIV)技术获取图像上粒子的偏移量以量化偏转角,再通过反投影重建原理获得气体折射率梯度,最后直接利用空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程实现不均匀温度场进行三维重构,准确、实时测量火焰温度场。

2 实验原理

2.1 基于投影式背景纹影技术的火焰温度场测量原理

实验装置的原理图如图 1 所示,其中 BS 为分光镜,BE 为扩束镜,LD 为激光器。本装置以半导体激光器作为光源,发射的激光经扩束镜作用后扩散为锥形光束,再经分束镜后分为两束光,其中反射光束照射到凸透镜后再经过测试区域,光线由于流场的折射率变化受到扰动,纹影图像在投影光屏上可直接呈现,实现了背景纹影的投影式可视化;然后,再利用投影在光屏(普通的 A4 白纸)上的光返回测试场后,经分束镜作用后的透射光进入到 CCD 摄像头进行画面捕捉,分析流场的信息;最后直接利

用空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程实现火焰温度场的测量。

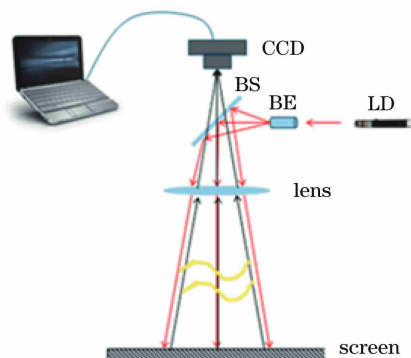


图 1 投影式背景纹影仪示意图

Fig. 1 Schematic of projective background-oriented schlieren apparatus

由于背景纹影技术是通过光线的偏折量来反映测试流场的密度变化情况,因此通过 PIV 技术求取背景斑点偏移量来量化偏折角。如图 2 所示,光线由于受到密度不均匀流场的干扰而发生偏折(偏折角为 θ), l 为 CCD 到测试流场的距离。通过 PIV 技术对光线经过测试场和未经测试场的两幅图像求取粒子的偏移量, ΔH 和 $\Delta H'$ 分别表示某背景斑点经测试流场后在 CCD 上的像素偏移量和实际背景斑点的偏移量,通过背景斑点的偏移量对偏折角进行量化。

在笛卡尔坐标系 (x, y, z) 中,把 z 轴作为光线的传播方向,假定记录的都是旁轴光线,偏折角极小,那么沿 x 轴方向上的偏折角为

$$\theta_x = \frac{\Delta H'_x}{L}, \quad (1)$$

式中 L 是测试流场到光屏的距离。

同理,可得沿 y 轴方向上的偏折角。那么,光线在 (x, y) 平面上发生偏折,则

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 n 是测试流场的折射率。对(2)式积分,可得到光线在 x 轴和 y 轴分量上的偏折角为

$$\begin{cases} \theta_x = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz \\ \theta_y = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \end{cases}. \quad (3)$$

(2)、(3)式表明,某一方向的偏折角是折射率在这一方向的梯度沿光程的积分,光线总是朝着折射率较大的区域弯曲,这也意味着,光线朝着较大密度 ρ 的方向偏转。

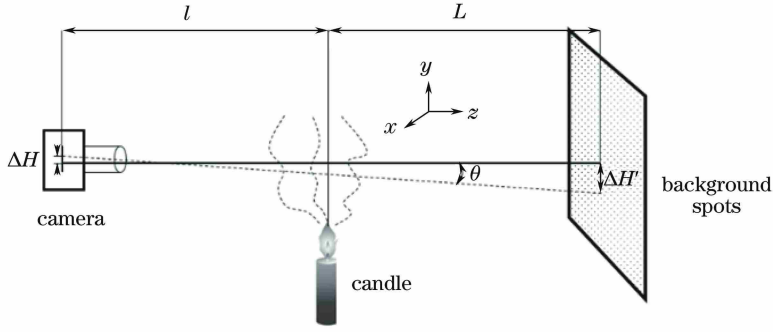


图 2 光线经测试流场后发生的偏移量

Fig. 2 Offset of light generated after flow field measurement

假设在给定的 (x, y) 位置上的 $\partial n / \partial x$ 和 $\partial n / \partial y$ 在 z 方向的 L 长度上为恒定值,那么(3)式可简化为

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} L \\ \theta_y = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} L \end{cases} \quad (4)$$

根据滤波反投影重建算法(Radon 反变换算法),折射率分布函数和投影如图 3 所示,其中 s 为投影极坐标。结合折射定律可知光线偏折角为^[18]

$$\varepsilon(s, \theta) = \int \frac{\partial n}{\partial s} dl \quad (5)$$

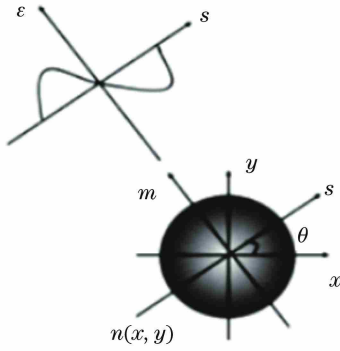


图 3 折射率分布函数和投影

Fig. 3 Refractive index distribution function and projection

用 $f(x, y)$ 来表示 $\partial n / \partial s$, 且当偏折角极小时,近似地认为沿光程就是沿 m 方向,在测量流场为气体时(气体的折射率总是接近于 1),则 Radon 变换式为

$$\varepsilon(s, \theta) = \int f(x, y) dm \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} s \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

为简化计算,设 u 为 s 方向的偏移量

$$u = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (8)$$

利用(1)式求取光线的偏折角后,通过逆变换,可得折射率沿 s 方向的分布情况,即

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{u-s} \frac{\partial \varepsilon(s, \theta)}{\partial s} ds d\theta \quad (9)$$

将求取的 $f(x, y)$ 沿 s 方向积分即可得折射率的分布,并通过折射率梯度,得到折射率变化。

对于空气或其他气体,由 Gladstone-Dale 公式可得该区域气体折射率对应的气体密度,即

$$n - 1 = K_{GD} \rho \quad (10)$$

式中常数 K_{GD} 是气体的一种属性,称为比折射度。

由文献[19-20]知,空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程可写成

$$n(t) = \frac{1 + [n(0) - 1]}{1 + at} \quad (11)$$

式中 $n(0)$ 是温度 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的折射率,拟合因子 $a = 0.00368^\circ\text{C}^{-1}$, a 的精度达到 $10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ [20],温度变化范围为 200°C 。由(11)式可得火焰温度场的各区域的温度 t (单位为 $^\circ\text{C}$),进而通过图像处理实现火焰温度场变化的可视化。

2.2 程序算法流程

1) 纹影图像采集

通过采取粒子追踪法求取偏移量,粒子在空气流场中偏离的速度飞快,而所设计装置采取非高频相机拍摄,无法在极短时间内捕捉到大多数粒子的去向,大多数粒子会脱离 CCD 的视野。因此,本装置采用视频采集软件 S-EYE 通过拍摄视频的方法来追踪粒子的去向,再通过视频的分帧操作选取相邻两张图片,使两张图片之间的时间间隔达到最小。整机程序算法流程如图 4 所示。

由于计算机配置不高,对一整张图片而言,相当于图片内含有限多的小模板,而模板匹配是针对图片上每一块小模板在另一张图片上找到其偏移后的匹配小模板,因此其计算量相当大,导致程序运行的时间过长,耗时多。为了提高计算的速度,节约时间,通过截图选取适当大小的迭代窗口尺寸进行处理分析。

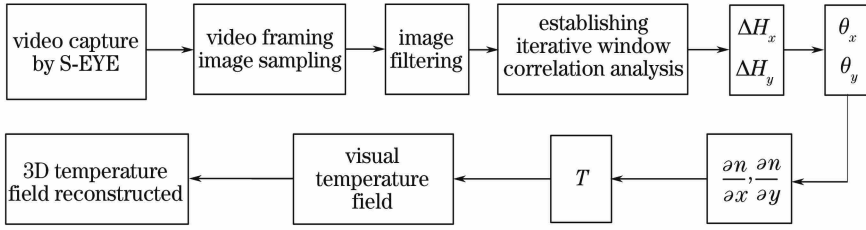


图4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

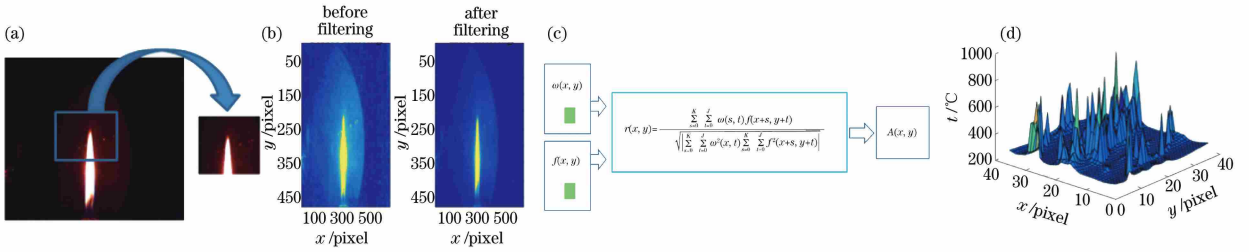


图5 各流程结果。(a)图像获取;(b)图像滤波;(c)相关性分析;(d)温度场重建

Fig. 5 Results for each process. (a) Image capture; (b) image filter; (c) correlation analysis;

(d) temperature field reconstruction

2) 滤波

由于噪声干扰,图像上出现随机分布的亮点或暗点,影响纹影图的质量,在一定程度上影响粒子定位的效果。为了提高纹影图质量,减少噪音的干扰和增强图像中目标与相邻区域的对比度,采取Hamming滤波器对图像进行平滑处理,提高粒子

定位的精度。

3) 相关性分析求取粒子偏移量

PIV技术中所获得的粒子图像信号是二维的,从粒子图像中获取速度信息用于研究两个图像信号的相似程度,因此需要求出二维相关函数的形式,即研究像素点位置的问题,如图6所示。

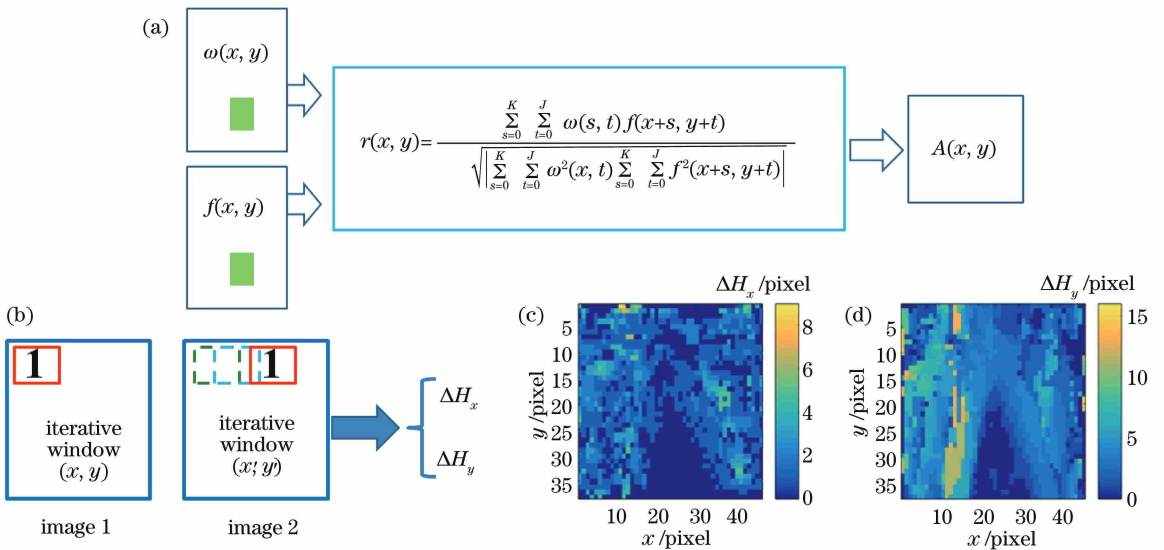


图6 图像的相关性分析。(a)相关函数;(b)相关性分析过程示意图;(c)斑点在 x 轴上的偏移量;(d)斑点在 y 轴上的偏移量

Fig. 6 Correlation analysis of images. (a) Correlation function; (b) schematic of correlation analysis process;

(c) offset of particles in x -axis direction; (d) offset of particles in y -axis direction

图像的相关性分析过程如下,在 $M \times N$ 主图像 1 的 $f(x, y)$ 中,通过逐点移动方式建立 $J \times K$ 的迭

代窗口 $\omega(x, y)$,使迭代窗口 $\omega(x, y)$ 依次在目标图像 2 的 $f(x, y)$ 中寻找相关程度最大的、大小相

同的迭代窗口,当相关系数达到最大值时,此刻 s 和 t 即为主图像 1 的迭代窗口 $w(x, y)$ 与目标图像 2 中寻找到的相关程度最大的迭代窗口之间的相对位移,并把每个迭代窗口匹配后的最大响应点 (x_0, y_0) 依次输入到与主图像一致的匹配位置。通常情况下,PIV 技术中两次曝光的粒子图像的亮度不均匀,同时在计算机程序设计中还要考虑计算时间问题,所以匹配尺度使用如下被规格化了的相互关系:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J \omega(s, t) f(x+s, y+t)}{\sqrt{\left| \sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J \omega^2(x, t) \sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J f^2(x+s, y+t) \right|}}, \quad (12)$$

式中 $x=0, 1, 2, 3, \dots, N-K, y=0, 1, 2, 3, \dots, M-J$, 表示子图像 $w(x, y)$ 在 $f(x, y)$ 中逐点地移动, 当子图像 w 与图像 f 达到最相似时, $r(x, y)$ 为最小值, 此时的粒子偏移最小。

如图 7 所示, 图 7(a) 与图 7(b) 分别为扰动后不同时刻获取的两张测试流场图, 以 x 轴为例, 由互相关算法可求取背景斑点在 x 轴上的偏移量。经过相关性分析后, 从图 7(c) 可以看出, 两个不同时刻下流场空气的流动情况。

测试流场斑点实际偏移量 $\Delta H'_x$ 为相机分辨率与图像斑点偏移量 ΔH_x 之积, 由于已知相机分辨率, 那么可得到测试流场中斑点实际的偏移量 ΔH_x , 再通过粒子偏移量来量化光线偏折角, 接着采用 Radon 变化求取折射率梯度, 从而可求出各区域对应的温度。

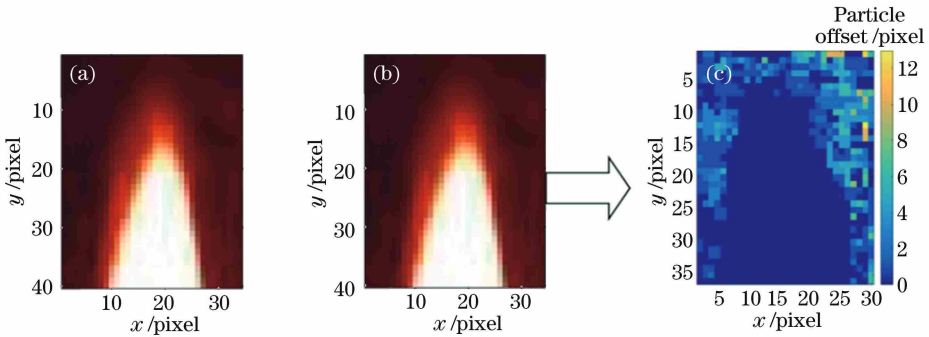


图 7 x 轴粒子偏移量。(a)时刻 1 的点火焰尖端截取图;(b)时刻 2 的点火焰尖端截取图;(c)斑点在 x 轴上的偏移量

Fig. 7 Offset of particles in x -axis direction. (a) Flame tip interception at moment 1; (b) flame tip interception at moment 2; (c) offset of particles in x -axis direction

4) 温度场三维重构

为了更直观地显示温度变化场, 采用 MATLAB 的反投影重建技术获得不均匀流场的空气折射率, 在空气折射率场中, 直接利用空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程重构火焰三维温度场^[17], 能够直观明了地反映出火焰温度分布。

3 实验装置与实验结果

3.1 实验装置

图 8 为基于投影式背景纹影技术的火焰温度场测量装置实物图。主要由激光器、扩束镜、半反透镜、凸透镜、光屏、CCD 摄像头以及装有 S-EYE 和 MATLAB 的计算机组成。以燃烧的蜡烛作为流场的干扰区, 光线由于流场的折射率变化受到扰动, 纹影图像可在投影光屏上直接呈现, 再通过 CCD 对纹影图像进行捕捉, 通过装有 S-EYE 和 MATLAB 的计算机进行图像的采集和处理, 从而获得火焰温度场。

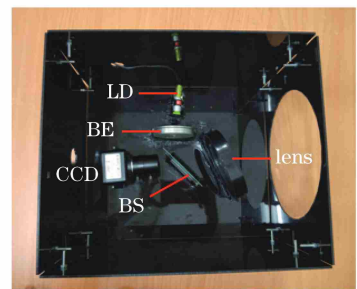


图 8 测试装置实物图

Fig. 8 Photograph of measurement instrument

3.2 实验结果

通过视频分帧操作, 得到不同时刻火焰温度图, 按图 9 所示截取火焰尖端。将不同时刻火焰尖端截取图进行对比, 如图 10 所示。通过粒子追踪法, 得到 x 轴和 y 轴的粒子偏移量, 如图 11 所示。再通过粒子偏移量来量化光线偏折角及 Radon 变化求取折射率梯度, 如图 12~15 所示。根据折射率与温度之间的关系, 最终实现蜡烛火焰尖端温度场测量,

重构三维温度场,如图 16 所示。火焰尖端某切面的温度分布图如图 17 所示,最高温度为 $743\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。文献[21]酒精灯火焰平均温度为 $788\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量结果与之相比,相对误差为 7.82% 。

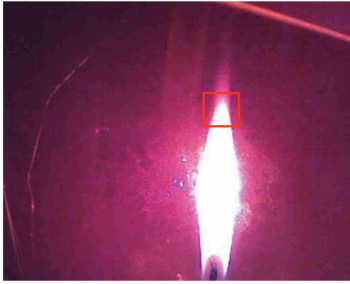


图 9 火焰尖端的截取图

Fig. 9 Flame tip interception

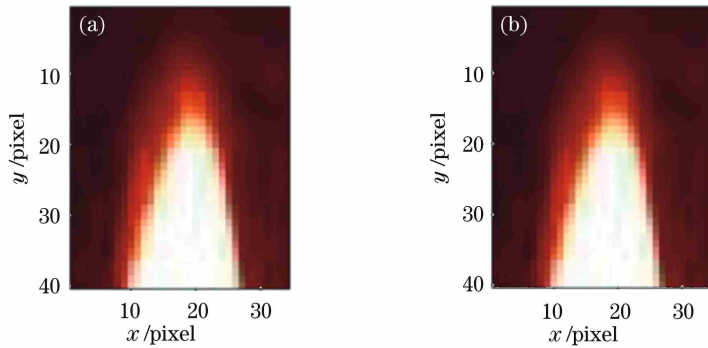


图 10 火焰尖端截取图。(a)时刻 1;(b)时刻 2

Fig. 10 Comparison among flame tip interceptions at different moments. (a) Moment 1; (b) moment 2

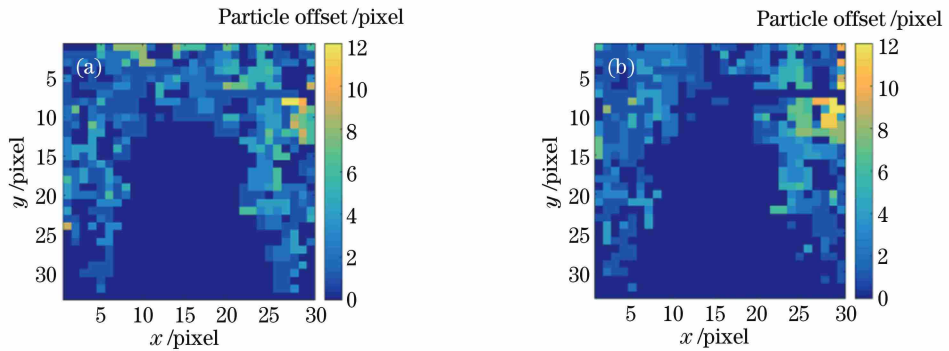


图 11 粒子偏移量。(a) x 轴;(b) y 轴

Fig. 11 Particle offset. (a) x -axis; (b) y -axis

4 结 论

基于不同密度气体存在折射率梯度的原理,设计了一种新型投影式纹影火焰温度场测量仪。本装置结合光学元件,可将纹影图像实时可视化,简化了普通背景纹影系统需要通过繁琐的计算机图像处理才能显示纹影效果,实现了基于背景纹影技术的投影式纹影可视化。通过 PIV 技术对 CCD 采集的纹影图像求取背景斑点偏移量来量化偏折角,并采用

在高温区温度场重建结果波动较大,这是因为高温区折射率接近 1,而密度值很小,通过空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程(11)式计算,测量误差引起的极小密度变化会导致较大的温度误差。蜡烛燃烧产生大量的二氧化碳与少量的烃类物质,使得火焰所在区域内空气成分改变,导致测量的准确性降低。同时,由于采取文献[19-20]的相关数据通过非线性拟合得到空气折射率对温度函数关系,以此求得的火焰温度场与实际温度存在一定偏差。另外,当凸透镜镜面放置于垂直 CCD 镜头所在的主光轴上时,所拍摄的画面中心会产生两个由凸透镜会聚而成的亮斑,造成投影光屏上的大圆斑形状发生畸变,也会对测量结果造成影响。

Radon 变化求取折射率梯度,直接利用空气折射率对温度的非线性曲线拟合方程得出流场各区域对应的温度场,再采用反投影重建技术对火焰的不均匀温度流场进行三维重构。实验结果表明,蜡烛火焰尖端最高温度为 $743\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对误差为 7.82% 。本文装置与传统的纹影仪相比,具有体积小、移动便携、操作简单、智能可视化、性价比高等特点,能实时、准确地实现火焰温度场的测量,为实现大视场定量的流场密度测量提供了一种简洁有效的方法。

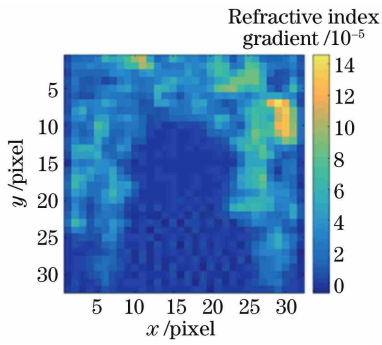


图 12 火焰尖端的折射率梯度

Fig. 12 Refractive index gradient at flame tip

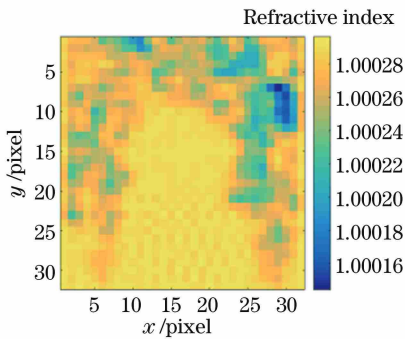


图 13 火焰尖端的折射率

Fig. 13 Refractive index at flame tip

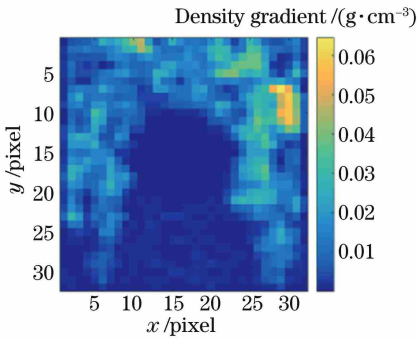


图 14 火焰尖端的密度梯度

Fig. 14 Density gradient at flame tip

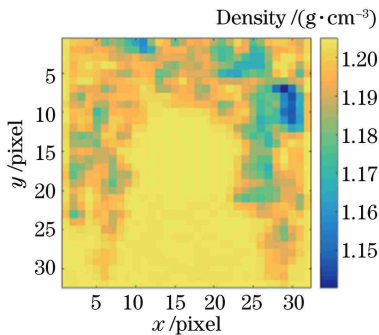


图 15 火焰尖端的密度

Fig. 15 Density at flame tip

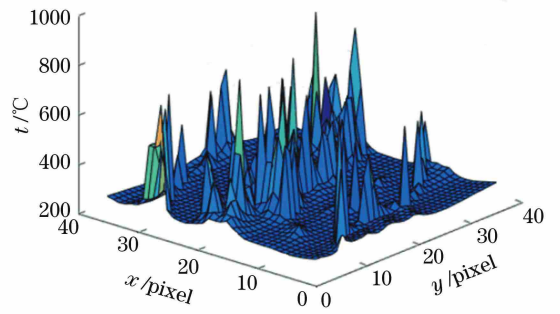


图 16 火焰尖端温度场的三维重构图

Fig. 16 3D reconstruction of temperature field at flame tip

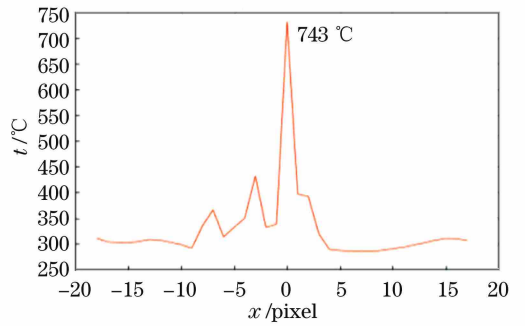


图 17 火焰尖端某切面的温度分布图

Fig. 17 Temperature distribution on tangent surface at flame tip

参 考 文 献

- [1] Bramanti M, Salerno E A, Tonazzini A, *et al.* An acoustic pyrometer system for tomographic thermal imaging in power plant boilers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 159-167.
- [2] Li Y Q, Zhou H C, He Q W. Simulation study on monitoring the two-dimensional characteristics of the tangential flow field by using an acoustic method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 215-219. 李言钦, 周怀春, 何其伟. 采用声波法监测四角切圆流场二维分布特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 215-219.
- [3] Gaydon A G, Wolfhard H G. Flames[M]. Wang F, Transl. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 208-213. 盖顿, 伍法德. 火焰学[M]. 王方, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 208-213.
- [4] Li C F. The technique in the measurement of temperature field by optical methods and its development[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2005, 18(7): 66-68. 李春芳. 光学测温技术及其新进展[J]. 武汉科技学

- 院学报, 2005, 18(7): 66-68.
- [5] Bengtsson P E, Alden M. C_2 production and excitation in sooting flames using visible laser radiation: implications for diagnostics in sooting flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991, 77(4/5/6): 307-318.
- [6] Wang H, Fu B, Liu G S, *et al.* Temperature test of motor combustion gas flow field with thermographic instrument [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2003, 26(2): 65-67.
王宏, 符彬, 刘桂生, 等. 用热像仪测试发动机燃气流场温度 [J]. *固体火箭技术*, 2003, 26(2): 65-67.
- [7] He B, Gong X H, Lin H, *et al.* Application of infrared thermal imaging device in temperature measurement of solid rocket motor plume [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005, 28(2): 153-156.
贺博, 龚晓红, 林辉, 等. 红外热像仪在固体火箭发动机羽焰测温中的应用 [J]. *固体火箭技术*, 2005, 28(2): 153-156.
- [8] Thakur M, Vyas A L, Shakher C. Measurement of temperature and temperature profile of an axisymmetric gaseous flames using Lau phase interferometer with linear gratings [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(4): 373-380.
- [9] Yan S Y, Chang Z, Wang F, *et al.* Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0722002.
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0722002.
- [10] Qu D S, Hong Y J, Wang G Y, *et al.* Study on mass flux measurement methods of gas based on scanning wavelength modulation spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904006.
屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于扫描波长调制光谱的气体质量流量测量方法研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904006.
- [11] Feng T Z, Liu C M, Zhao R X, *et al.* Schlieren methods: a review of techniques [J]. *Journal of Ballistics*, 1994, (2): 89-96.
冯天植, 刘成民, 赵润祥, 等. 纹影技术述评 [J]. *弹道学报*, 1994, (2): 89-96.
- [12] Wang G J, Yang Z J, Meng S, *et al.* Application of quantitative background oriented schlieren in laminar axisymmetric flame temperature measurement [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(2): 103-110.
王根娟, 杨臧健, 孟晟, 等. 背景纹影定量在层流轴对称火焰温度场测量中的应用研究 [J]. *实验流体力学*, 2016, 30(2): 103-110.
- [13] Kurihara N, Nishikawa M, Watanabe A, *et al.* A combustion diagnosis method for pulverized coal boilers using flame-image recognition technology [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1986, EC-1(2): 99-103.
- [14] Collins S. Advanced flame monitors take on combustion control [J]. *Power*, 1993, 137(10): 75-78.
- [15] Huang Y, Yan Y, Riley G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500 kW model furnace using the two-colour method [J]. *Measurement*, 2000, 28(3): 175-183.
- [16] Wang B X, Li T D, Wu Z S. The study of image processing technique used for luminous-flame temperature distribution measurement [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1989, 10(4): 446-448.
王补宣, 李天铎, 吴占松. 图象处理技术用于发光火焰温度分布测量的研究 [J]. *工程热物理学报*, 1989, 10(4): 446-448.
- [17] Zhou H, Lü X L, Li Q Y, *et al.* Temperature measurements using the background oriented schlieren technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(5): 63-67.
周昊, 吕小亮, 李清毅, 等. 应用背景纹影技术的温度场测量 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(5): 63-67.
- [18] Liu T C, Merzkirch W, Oberste-Lehn K. Optical tomography applied to speckle photographic measurement of asymmetric flows with variable density [J]. *Experiments in Fluids*, 1988, 7(3): 157-163.
- [19] Murphy J C, Aamodt L C. Photothermal spectroscopy using optical beam probing: mirage effect [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(9): 4580-4588.
- [20] Xing J H. Influence of temperature on the refractive index nonlinearity of gas [J]. *Physics Experimentation*, 2005, 25(4): 35-36, 39.
邢进华. 温度对气体折射率的非线性影响 [J]. *物理实验*, 2005, 25(4): 35-36, 39.
- [21] Hao J S, Zhou J K. Measurement of flame temperature of wine lamp [J]. *Education in Chemistry*, 2004(6): 5-7.
郝金声, 周进康. 酒精灯火焰温度的测量 [J]. *化学教学*, 2004(6): 5-7.