

应用背景纹影技术的温度场测量

周昊, 吕小亮, 李清毅, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Temperature Measurements Using the Background Oriented Schlieren Technique

ZHOU Hao, LÜ Xiaoliang, LI Qingyi, CEN Kefa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization Institute (Zhejiang University),
Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: This paper presents a simple way of reconstructing the temperature field. By using only a digital camera and a structured background, background oriented schlieren can get the light projection in one direction of the temperature field. The image was processed by particle image velocimetry software to obtain the deflection angle of light. Deflection angle of light passing over flame of Bunsen burner were used to reconstruct index of refraction field from algebraic reconstruction technology. Then the Gladstone-Dale relation and the Idea-Gas equation were used to obtain the temperature field. Comparing the temperature field with the results which were got by the sodium line-reversal method, this technology can get excellent Temperature field. Since it is very mature and the test conditions for it are simple, algebraic reconstruction technology has wide application prospects.

KEY WORDS: background oriented schlieren; Bunsen burner flame; algebraic reconstruction technology; index of refraction field; temperature field

摘要: 为了重建温度场, 通过试验获得存在温度场梯度分布的背景斑点图像和不存在温度场梯度分布的背景斑点图像, 然后使用粒子图像处理软件对 2 幅图像进行互相关分析, 求取背景粒子偏移量, 即获得光线通过温度场以后在相机上的投影偏折角。将获取的任意切面偏折角数据进行迭代重建,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB219802); 浙江省自然科学基金资助项目(R107532); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0761); 全国优秀博士学位论文作者专项资金(200747); 浙江大学曹光彪高科技发展基金资助(2008RC001)。

National Program on Key Basic Research Project(2009CB219802); Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China(R107532); TransCentury Training Programme Foundation for the Talents of Humanities and Social Science by the State Education Commission (NCET-07-0761); A Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China(2009CB219802); Foundation of Cao Guangbiao High-tech development Zhejiang University(2008RC001).

求取这一切面的折射率分布, 最后根据盖斯公式和气体状态方程进行求解, 获得任意切面的温度场分布, 将重建结果和谱线反转法测定的温度场进行比较, 温度场分布符合实际情况。试验条件较为简单, 迭代重建算法也极为成熟, 具有广泛应用前景。

关键词: 背景纹影技术; 本生灯火焰; 迭代重建法; 折射率场; 温度场

0 引言

传统纹影技术作为一种非接触的光学测量方法, 已经在火焰温度场测量中得到广泛应用^[1-2], 但是在传统纹影测量中, 火焰本生的自发光给传统纹影技术的照度量化带来了困难, 同时它还需要激光发射器等许多非常昂贵精密的光学仪器, 这样, 它基本上不可能同时获得各个方向的观察数据, 造成基于传统纹影技术的三维重建难以实现。同时, 目前常用的基于数字图像处理^[3]的温度场测量方法也难以获取三维温度场信息。

与传统纹影技术相似, 由 Meier 和 Richard H 等人发展起来的背景纹影技术^[4-6]也是利用光线在变密度介质中的折射来测量密度场。但是它结合使用粒子图像测速法(particle image velocimetry, PIV)测量中的粒子图像处理方法, 不需要极为精密的透镜和切割光阑等传统纹影的设备, 所以它对环境条件要求很低。同时由于没有了透镜大小对测量范围的限制, 背景纹影技术可用于测量大型密度场的变化以满足工程需要; 目前背景纹影技术在国外已广泛应用于高速流场的密度场测量, 如风洞测量^[5-6]、叶片旋流测量^[7-8]、气体射流测量^[9]等, 而国内还没有相关文献报道。

本文采用背景纹影技术, 使用了一台相机和一

副背景对本生灯温度场进行拍照,再通过 PIV 粒子图像处理技术直接获得光线通过本生灯温度场的偏移量,最后使用迭代重建算法获得本生灯的温度场信息。这种方法由于直接使用背景斑点求取光线偏移量,不会因为火焰的自发光引起误差;而在传统纹影技术中因为通过光强量化来求取偏折角,火焰自发光对光强的影响会直接导致偏折角的固有误差。同时因为相机较传统纹影技术中昂贵的光学仪器更为容易获得,方便了在工程中的使用,并且还能够通过多台相机获取多个投影,进行复杂场的重建。迭代算法的使用,避免了常用的逆 abel 转换积分奇点引起的误差。

1 背景纹影技术

一般情况下,气体密度 ρ 与气体折射率 n 的关系可以用格拉斯通-戴尔(Gladstone-Dale)公式表示:

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

常数 K_{GD} 是气体的一种属性,称为折射性或比折射度。

如图 1 所示,当来自背景的光线穿过测量流场时,因为折射率变化而发生偏折,虚线表示没有测量流场时背景斑点在 CCD 上的投影,实线表示光线偏折以后斑点的投影情况, ΔH 表示在加入测量流场以后,背景同一斑点发生的像素偏移量。获得前后 2 幅这样的图像,然后使用 PIV 粒子图像分析技术求取 2 幅图像中所有斑点发生的偏移 ΔH ,就可以求取所有来自背景的光线经过测量范围发生的偏移情况。

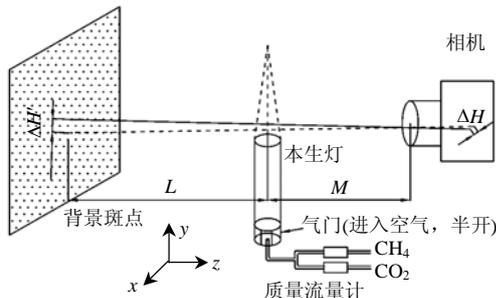


图1 背景纹影实验原理图
Fig. 1 Experimental scheme of background oriented schlieren

假定记录的都是旁轴光线,偏折角极小,那么 x 方向偏折角^[10]为

$$\theta_x = (1 + M/L)\Delta H'_x / (L + M) \quad (2)$$

式中 $\Delta H'_x$ 为相机分辨率和 ΔH_x 之积。同时由光线偏折角公式可知:

$$\theta_x = \frac{1}{n_0} \int_{ray} \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad (3)$$

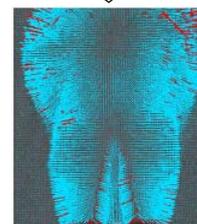
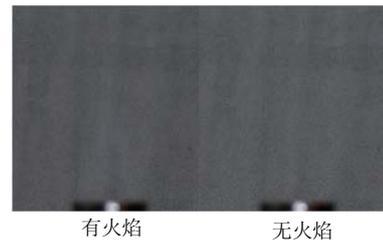
某一方向的偏折角是折射率在这一方向的梯度沿光程的积分,即偏折角是折射率梯度场的 radon 变换,则折射率梯度场可以从 radon 逆变换来重建^[11], Matlab 软件图像处理工具箱有逆 radon 函数“iradon”,可以使用它非常方便的进行重建,对于中心对称的折射率场,则可以使用逆 abel 转换来进行重建^[12]。但是逆 abel 转换函数存在固有的积分奇异点问题^[13],中心奇异点以及其他积分奇点的产生会严重影响重建的精度。本文为了解决这个问题,将测量场进行网格划分,直接使用迭代重建算法对其进行求解,避免了积分奇点引起的误差。

2 折射率场的重建

2.1 图像处理

首先使用 PIV 处理软件(Urapiv-Winxp)处理图像,选取适当大小的迭代窗口尺寸,将有火焰和无火焰的 2 幅图像(文中为了排版要求进行了压缩)进行相关性分析,如图 2 所示,迭代窗口尺寸的选择跟斑点的密度相关,实验选取 32×32 像素的迭代窗口,水平迭代间距为 10 像素,垂直迭代间距为 16 像素。背景斑点布置情况也会影响到求取精度^[14],合适的自然背景也是可以的,同时为了提高精度,斑点的大小最好为 3 个像素^[10]。

获得位移数据以后,选取任意高度的切面进行重建,不需要考虑高度方向的偏移量,将水平方向的位移量代入公式(2)就得到了所需要的这个切面的偏折角数据。本文受实验条件限制,只使用了一台相机,为了投影重建实现的需要,假设火焰是完全对称的;对投影数据进行对称处理,即将左右投



斑点偏移量分析结果

图2 图像处理
Fig. 2 Image Processing

影数据求取平均值来进行重建。

2.2 折射率场的网格划分

在 Particle Image Velocimetry 软件分析图像时候，因为水平迭代长度为 10 个像素，即每隔 10 个像素求取一次偏移量，网格也按照 10×10 个像素大小划分，如图 3 所示。

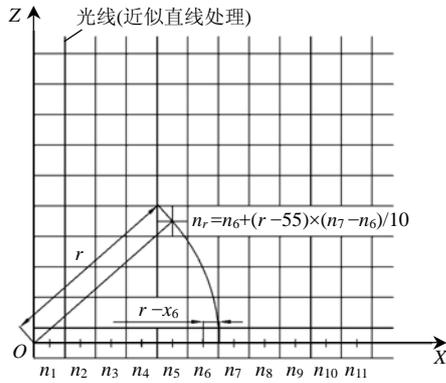


图 3 折射率场网格划分

Fig. 3 Grid of index of refraction field

因为测量范围尺寸远小于相机和火焰的距离，同时气体的折射率小于 1.0003，约等于 1，光线偏折极小，透过火焰的光线可近似按照直线处理，并且假设光线如图 3 所示通过每个网格的边界。

由于气体的 n_0 总是约等于 1，由式(3)可知，在某一个很小区域内，偏折角的变化量为

$$\theta_x = \frac{\Delta n_x \times \Delta z}{\Delta x} \quad (4)$$

当 Δz 和 Δx 都取 10 个像素时，也就是在每个网格内，光线在 x 方向的偏折角约等于折射率在 x 方向的网格内变化量。如图 3 中左侧第 1 条光经过第 1 个网格和第 2 个网格共有边界以后，其在 x 方向产生的偏折角为右侧网格中心折射率 n_2 减去左侧网格中心点折射率 n_1 ，即

$$\theta_x = n_2 - n_1 \quad (5)$$

而经过 y 轴的光线产生的偏折角为 0。

2.3 迭代重建

图 3 中每一条光线经过折射率场以后，其总的偏移量为其右侧所有网格中心点折射率之和减去左侧所有网格中心点折射率之和。而每个网格中心点的折射率可以采用线性内插法根据它相对中心的位置 r 求取，为 X 轴上相邻网格中心折射率 n_x 和 n_{x-1} 的函数。将某一光线右侧所有网格中心折射率用 n_x 和 n_{x-1} 表示，则右侧所有网格中心折射率之和可以表示为变量 n_1 到 n_{54} 的线性函数。

$$n_x^R = [y_1^R \ y_2^R \ y_3^R \ \dots \ y_{54}^R] [n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots \ n_{54}]^T \quad (6)$$

式中常数 y_x^R 为右侧所有网格相应 n_x 的系数之和，设 y_x 等于 y_x^R 减去 y_x^L 。则光线在 x 方向的偏折角可以表示为

$$\theta_x = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_{54}] [n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots \ n_{54}]^T \quad (7)$$

试验中发现，当 x 超过 54×10 个像素时，光线总的偏折角为零，则认为 n_{55} 及其以后的折射率为环境折射率。而每隔 10 像素的 θ_x 可以使用式(2)求取，建立如下线性方程组：

$$\begin{bmatrix} y_1^1 & y_2^1 & y_3^1 & \dots & y_{54}^1 \\ y_1^2 & y_2^2 & y_3^2 & \dots & y_{54}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{54} & y_2^{54} & y_3^{54} & \dots & y_{54}^{54} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_{54} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_x^1 \\ \theta_x^2 \\ \theta_x^3 \\ \vdots \\ \theta_x^{54} \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了求解复杂的折射率场，可以通过同时拍摄多组图像来获得多组偏折角信息。

3 实验及重建结果

为了避免甲烷气体和空气的密度不同而引起的实验误差，将甲烷和二氧化碳按 1:1 的体积比例混合，再通入本生灯燃烧，由分子量计算可得，混合气体密度约等于空气密度；同时由甲烷和空气燃烧化学方程式可得，分子数目前后没有变化，则密度场的变化将完全由温度场决定。而工程中混合气体密度与空气密度相差较大时，往往会产生误差。Xiao.X 等人利用传统纹影技术对混合气体密度不同于空气密度的燃烧工况进行温度场重建，并分析了由此产生的各种误差^[15-19]。

实验获得本生灯气门全开的完全预混火焰以及本生灯气门半开的部分预混火焰 2 组工况数据。背景图案采用钢笔随机点的斑点，图案和本生灯距离 L 为 1200mm，相机和本生灯间距 M 为 400mm，相机采用尼康的 Coolpix S4000，使用最大光学变焦， f 为 19.6 mm(视角相当于 35 mm 标准格式的中 108 mm 镜头)，采用最高分辨率模式，拍摄相片为 4 000×3 000 像素，求得分辨率 0.125 mm/像素。室温条件为 30 ℃，求得环境折射率 n_n 为 1.000260。

为了方便和传统纹影技术比较，在未进行投影重建前，先对图 2 中的偏移向量求模，如图 4 所示。对比图 2、图 4 和图 5^[20]可知，背景纹影技术也能够清晰观察到火焰温度场剧烈变化的区域，并且直接量化了经过火焰后的光线偏折情况，还以向量的形式指出密度变化的方向。

但是目前所得还只是火焰密度场大致的变化

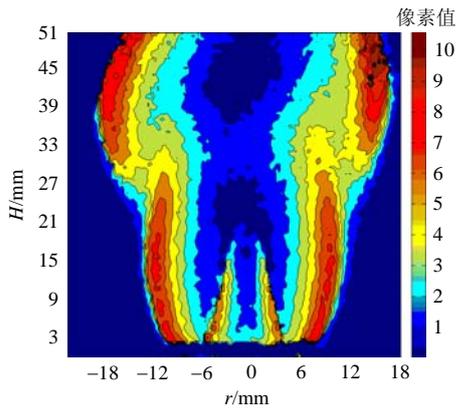


图4 偏移向量大小(像素)分布

Fig. 4 Offset vector magnitude (pixels)

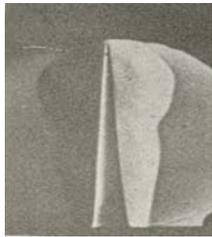


图5 本生灯火焰传统纹影图像

Fig. 5 Schlieren images of Bunsen burner flame

情况,为了求得火焰的实际温度,选取本生灯出口中 12 mm 高处切面的 x 方向投影数据进行迭代重建。重建结果如图 6 所示。

图 6 中实线和虚线分别为完全预混火焰折射率和部分预混火焰折射率分布,再依次使用式(1)和气体状态方程式求得对应的密度和温度变化如图 7、图 8 所示。

从温度径向分布图 8 可知,火焰从内焰面开始温度急剧升高,经过内焰面后,温度仍然继续升高,直到达到最大值,然后开始迅速降低到室温。其中,完全预混火焰经过内焰面以后温度升高更为明显,而部分预混火焰经过内焰面以后因为氧量耗尽出现扩散燃烧,温度升高不明显。将温度场重建结果和谱线反转法、微型热电偶所测定的温度场^[19-21]进行比较,温度变化曲线完全符合,但是因为加入二

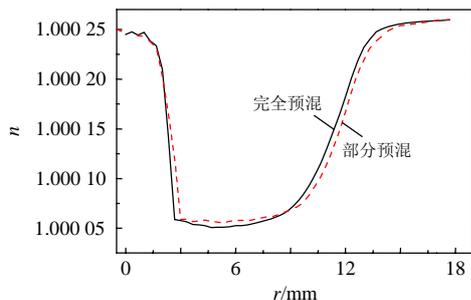


图6 折射率径向分布

Fig. 6 Radial index of refraction

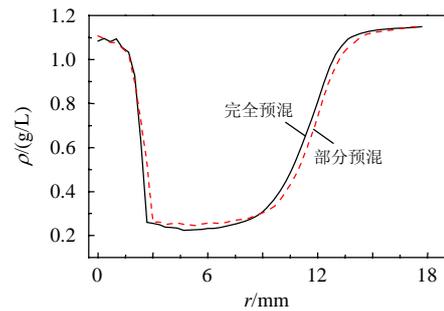


图7 密度径向分布

Fig. 7 Radial density

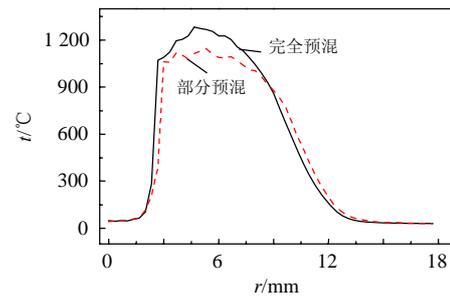


图8 温度径向分布

Fig. 8 Radial temperature

氧化碳气体总体温度变低。

同时,在高温区温度场重建结果波动较大,这是因为在高温区域折射率接近于 1,而密度也已经接近于零,利用等压气体状态方程式(9)进行计算,则

$$T' = T\rho / \rho' \quad (9)$$

测量误差引起的极小密度变化会导致较大的温度误差。为了减少高温区域波动,对测量所得偏折角数据进行平滑滤波,再进行迭代重建,得到完全预混火焰的温度场云图(图 9)。而在低温区域,测量误差对温度场重建的影响较小,迭代重建结果接近于实际温度。

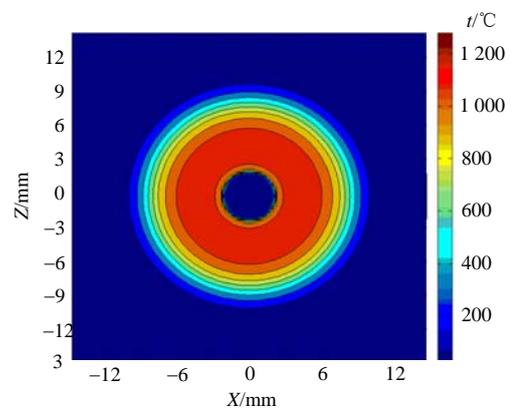


图9 切面温度场分布

Fig. 9 Section temperature

4 结论

本文首先使用背景纹影技术获得本生灯预混

火焰的光线偏移量,然后使用迭代重建算法对折射率场进行三维重建,获得火焰的温度场分布。背景纹影技术的特点在于它的设备便宜和容易实现,使用普通相机就能够满足实验要求,同时它在实现三维重建方面也具有直接量化投影数据的优势,只要获得足够多方向的投影数据,就可以使用迭代重建算法进行复杂温度场的重建。

参考文献

- [1] Alfonso F I, Sung C J. Flame temperature and location measurements of sooting premixed Bunsen flames by rainbow schlieren deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(17): 3565-3575.
- [2] Schwarz A. Multi-tomographic flame analysis with a schlieren apparatus[J]. *Measurement Science & Technology*, 1996, 7(3): 406-413.
- [3] 李汉舟, 潘泉, 张洪才, 等. 基于数字图像处理的温度检测算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 23(6): 195-199
Li Hanzhou, Pan Quan, Zhang Hongcai, et al. A study of algorithms of temperature measurement based on digital image processing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 23(6): 195-199(in Chinese).
- [4] Meier G E A. New optical tools for fluid mechanics[J]. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 1998, 37(2): 557-567.
- [5] Venkatakrishnan L, Meier G E A. Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(2): 237-247.
- [6] Richard H, Raffel M. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method[J]. *Measurement Science & Technology*, 2001, 12(9): 1576-7585.
- [7] Roosenboom E W M, Schroder A. Qualitative Investigation of a Propeller Slipstream with Background Oriented Schlieren[J]. *Journal of Visualization*, 2009, 12(2): 165-172.
- [8] Kindler K, Goldhahn E, Leopold F, et al. Recent developments in background oriented Schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 43(2-3): 233-240.
- [9] Dubois J, Amielh M, Anselmet F, Gentilhomme O. Investigation of axisymmetric underexpanded air and helium jets by background oriented schlieren[J]. *Journal of Visualization*, 2009, 12(3): 192-192.
- [10] Goldhahn E, Seume J. The background oriented schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 43(2-3): 241-249.
- [11] 庄天戈. CT原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992: 30-37.
Zhuang Tiange. Principle and algorithm of CT[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992: 30-37 (in Chinese).
- [12] Xiao X D, Puri I K, Agrawal A K. Temperature measurements in steady axisymmetric partially premixed flames using rainbow-schlieren deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 1922-1928.
- [13] 邵华, 朱丹平, 吴毅雄. Abel 逆变换的数值算法[J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(08): 1375-1378.
Shao Huaa, Zhu Danpingb, Wu Yixiong. Numerical methods of abel inversion[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(08): 1375-1378(in Chinese).
- [14] Hargather M J, Settles G S. Natural-background-oriented schlieren imaging[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 43(1): 59-68.
- [15] Agrawal A K, Butuk N K, Gollahalli S R, et al. Three-dimensional rainbow schlieren tomography of a temperature field in gas flows[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(3): 479-485.
- [16] Xiao X D, Choi C W, Puri I K. Temperature measurements in steady two-dimensional partially premixed flames using laser interferometric holography[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 120(3): 318-332.
- [17] Xiao X D, Puri I K. Temperature measurements in steady axisymmetric partially premixed flames using rainbow Schlieren deflectometry[J]. *Optical Diagnostics for Fluids Solids and Combustion*, 2001, 4448: 370-379.
- [18] Qin X, Xiao X D, Puri I K, et al. Effect of varying composition on temperature reconstructions obtained from refractive index measurements in flames[J]. *Combustion and Flame*, 1998, 27(2): 1631-1637.
- [19] Ibarreta A F, Sung C J. Flame temperature and location measurements of sooting premixed Bunsen flames by rainbow schlieren deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(17): 3565-3575.
- [20] Karlovitz B, Denniston D W, Knapschaefter D H, et al. Studies on Turbulent flames[C]//Fourth Symposium on Combustion. Proceedings of the Combustion Institute, Cambridge, Massachusetts, 1953.
- [21] Lewis B, Von Elbe G. Stability and structure of burner flames [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1943, 11(2): 75-97.



周昊

收稿日期: 2010-09-10。

作者简介:

周昊(1973), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程热物理, zhouhao@cme.zju.edu.cn;

吕小亮(1986), 男, 硕士, 研究方向为燃气温场测量, er11123456@zju.edu.cn;

李清毅(1985), 男, 硕士, 研究方向为电厂优化配煤和燃煤添加剂, liqy@zju.edu.cn;

岑可法(1935), 男, 院士, 研究方向为工程热物理, kfcen@sun.zju.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)