

文章编号 1004-924X(2015)增-0221-08

用于超燃流场羟基标记示踪背景抑制的 逐步逼近特征窗口滤波

邵 珺^{1,2*}, 叶景峰², 胡志云², 李景银¹

- (1. 西安交通大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710049;
2. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:针对复杂特殊超声燃流场背景下 HTV(羟基分子标记示踪)测量精度的提高,提出了逐步逼近特征窗口滤波的背景抑制方法,开展了 HTV 精细化测量。分析了超音速燃烧流场强背景噪声对 HTV 测量中图像处理的干扰;在窗口滤波背景抑制的基础上,针对燃流场某些位置流速明显变化造成 HTV 标记线变形,扭曲、模糊等情况,采取了分区处理并逐步缩小滤波窗口策略,使得每个分区窗口内的标记线图像沿轴向逼近高斯分布;最后结合中值滤波的图像分析方法,获得了一种应用于燃烧流场的 HTV 背景去除方法。分析讨论了该方法的可行性,确定了实验参数并对实验数据进行处理。对比实验表明:优化处理后提高了图像信噪比,测速精度提高了 18.8%,基本满足了 HTV 技术应用中对信噪比和测量精度的要求。

关键词:图像处理;HTV(羟基分子标记示踪);超声燃流场;背景抑制;逐步逼近特征窗口滤波

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0221

Progressive approach characteristic window filtering for HTV background suppression in supersonic combustion field

SHAO Jun^{1,2*}, YE Jing-feng², HU Zhi-yun², LI Jing-yin¹

- (1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
 2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)
- * Corresponding author, E-mail: shaojun@nint.ac.cn

Abstract: To improve speed measuring accuracy of Hydroxyl Tagging Velocimetry(HTV) in a complex and special supersonic combustion flow field, a progressive approach characteristic window filtering was proposed to do the meticulous measurement. Firstly, the influence of background noise of the supersonic combustion flow field on the image processing of the HTV measurement was analyzed. Then, on the basis of the background suppression by the window filtering, the deformation, distortion, blur of HTV tag line caused by the flow rate change in fuel flow field significantly in some locations were processed by taking the partition processing method, the filter window was gradually nar-

收稿日期:2015-05-26;修订日期:2015-06-18.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1306)

rowed, and the tag line along the width direction of the image within the window for each partition was approached to Gaussian distribution. By combined with image analysis methods in median filtering, the HTV background removal method was achieved for the combustion flow field. The feasibility of the method was analyzed and discussed, and corresponding parameters were determined by the experimental processing. Comparison of experimental data shows that after optimization, the Signal to Noise Ratio(SNR) is greatly improved, the accuracy has increased by 18.8%, which satisfies the system requirements of the HTV application for the SNR and measurement precision.

Key words: image processing; Hydroxyl Tagging Velocimetry(HTV); supersonic combustion flow field; background suppression

1 引言

羟基分子标记示踪速度测量技术(Hydroxyl Tagging Velocimetry, HTV)由于无流场跟随性和无需种子注入等优势,已成为发动机测量、燃烧流场诊断、燃烧机理研究等相关领域亟待发展的测量技术之一^[1-2]。早在 20 世纪美国 Vanderbilt 大学就对 HTV 技术开展了研究,随后 HTV 技术便应用于超声速流场凹腔速度的分布测量,航空发动机出口的流场速度测量,常温激波管中锥形头部激波速度测量等场合。目前,虽然低温场的 HTV 速度测量已经实现^[3-5],但 HTV 在高温超燃流场的应用却鲜有报道。OH 在高温环境中的寿命相对更长,更适用于超燃流场,但针对高压高温、强背景光的复杂燃烧场,激光诱导荧光信号受碰撞淬灭以及背景光的影响,图像信噪比锐减,难以提取标记线。因此,图像处理是制约该技术应用于高温超燃流场的主要原因。

本课题组已开展了 HTV 技术相关的基础研究和实验测试^[6-7]。将这一技术用于测量超燃冲压发动机的流场速度,并获得了有效的实验数据。为了进一步开展 HTV 技术精细化测量方法的研究,首先要解决图像的背景干扰。近年来,以滤波方法为主的背景抑制技术得到了快速发展^[8-10]。为了保留并增强有效信号特征,滤波方法大多针对背景和信号进行自适应抑制,目前普适性的背景抑制算法还未见报道。因此人们基于高温超燃流场特性,对比常用滤波方法提出了窗口滤波背景抑制方法。该方法基于 OH 荧光信号特征,径向(垂直于流场流动方向)灰度统计荧光信号,整体空间滤波,较好地抑制了全局杂散噪声。然而超燃流场中的流动为紊流,不同于层流的非稳态

流动,空间上处于高度无序和混沌状态流场的复杂运动,可能会造成 HTV 标记线的形状突变和不规则,如直线变斜、变弯曲。当 OH 标记线的荧光信号径向存在突变,不沿直线分布时,直接进行整体滤波会忽略有效信号的细节信息,造成误差。因此在这种情况下,窗口滤波的背景抑制方法不太适用。本文提出了一种逐步逼近特征窗口滤波背景的去噪方法,以 HTV 技术在超燃冲压发动机(燃料为 H₂)拍摄到的 OH 荧光图像为对象,依据信号特征,采用逐步逼近的方式选取滤波窗口,有效地改善了滤波去噪的效果。

2 HTV 背景抑制技术

2.1 HTV 技术

HTV 技术用 193 nm 激光解离流场中水分子产生的 OH 作为流场标记;通过(Planar Laser-induced Fluorescence)PLIF 技术显示 OH 分子跟随流场运动的状况,利用公式 $v = d/t_d$ (式中 v 为速度, d 为位移量, t_d 为时间间隔)即可获得流场的速度特性。然而实验得到的仅是两条有一定宽度的标记线图像,如何精确提取标记线的位置成为 HTV 精细测量的关键。

2.2 对比常用背景抑制方法

实验测得的流场的燃烧区标记线图像背景中存在大量 OH 荧光干扰,如图 1(a)所示。这些噪声与信号不宜区分;从形状分布上,各区域的噪声灰度分布也有差异,超燃流场造成了 HTV 标记线形状突变,即直线变斜、变弯曲,信噪比降低,如图 1(b)所示。此时很难将标记分子线沿宽度方向的强度分布近似为高斯函数的特征,提取标记线位置,因此背景抑制是精确提取标记线重要且关键的一步。

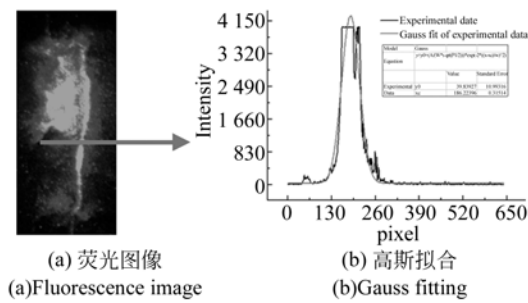


图 1 流场干扰下的荧光图像

Fig. 1 Tagging fluorescence image with flow interference

常用的中值滤波是一种全局性平滑滤波方法, 可较好地抑制随机噪声, 但面对燃烧流场激光诊断的复杂背景, 局部检测性能下降, 如图 2 所示。这里在局部信号提取的基础上, 采用中值滤波对信号进行平滑处理, 优化算法。

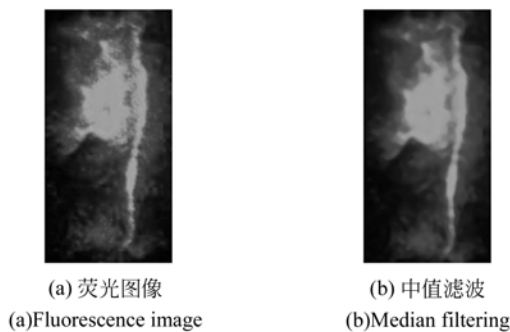


图 2 中值滤波结果

Fig. 2 Fluorescence image with median filtering

同时对比了线性滤波、拉普拉斯锐化、维纳滤波等常用的图像分析方法, 它们仅可抑制部分电传感器噪声、相片颗粒噪声、信道传输误差噪声等物理噪声, 背景抑制效果并不好。因此, 针对超燃流场的实际应用背景, 本文提出了逐步逼近窗口滤波背景的抑制方法。

2.3 逐步逼近窗口滤波背景抑制方法

逐步逼近特征窗口滤波方法抑制背景的步骤见图 3。根据测得的 OH 荧光图像, 有效信号基本结构呈线性分布; 背景干扰大致呈椭圆或者圆形分布, 如图 4 所示, 因此构造一幅存在背景干扰的 280×480 的 OH 标记线荧光图像, 二维数组为 $[A_{1,1} \dots A_{280,480}]$, 如图 5(a) 所示。干扰区域的轴向坐标范围为 (a, b) , 信号区域的轴向坐标范围为 (c, d) 。实际图像的干扰区域径向灰度统计

$\max \sum_{i=1}^{480} A_{(a,b),i} \geq \min \sum_{i=1}^{480} A_{(c,d),i}$, 因此宜直接采用空间滤波。

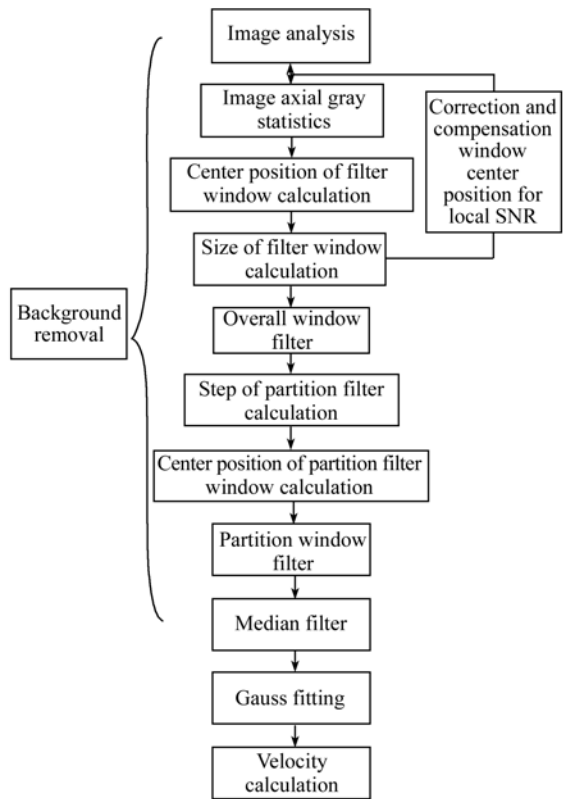


图 3 背景抑制方法

Fig. 3 Flowchart of background suppression method

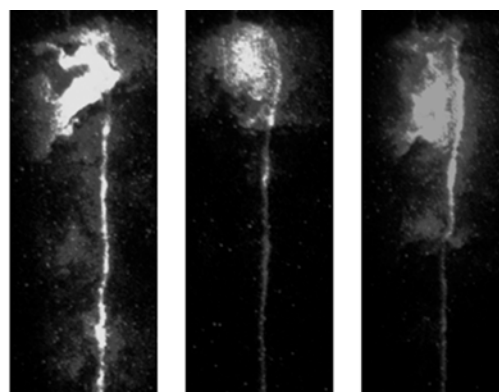


图 4 实验的荧光图像

Fig. 4 Experimental tagging fluorescence images

首先分析荧光图像的灰度分布情况: 干扰区主要集中在 A、B、C、D 4 点构成的区域, 灰度统计时避开干扰区, 选取 A、D、F、E 4 点构成的区域进行径向灰度统计, 结果如图 5(a) 所示。整体滤波窗口中心位置的轴向坐标确定为 149, 取窗

口大小为 37 pixel,通过整体滤波确定了感兴趣区域,结果如图 5(b)所示。然后根据灰度分布的变化进行线特征分区处理,结果如图 5(c)所示。每个分区信号在径向上大致呈直线分布,在此基础上进行信号提取,结果如图 5(d)所示,而图 5(e)为用直接拟合方法处理得到的荧光图像。两种滤波方法的高斯拟合结果对比见表 1。由表可知,该方法提高了信号识别能力和速度测量精度。

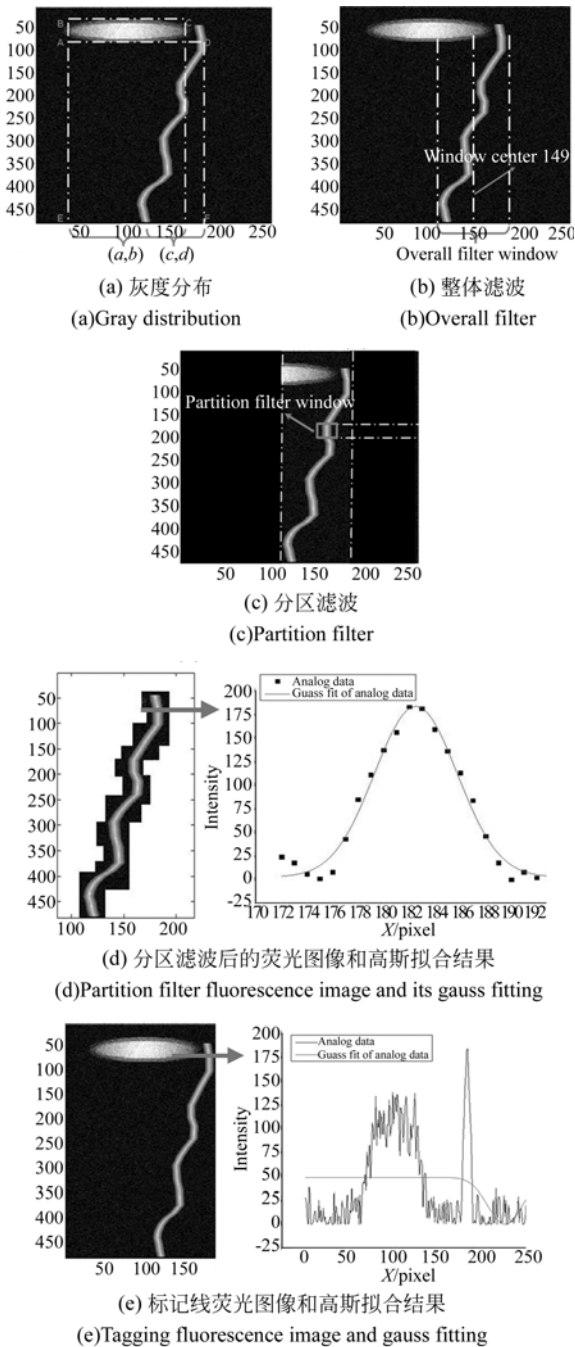


图 5 荧光图像的模拟数据
Fig. 5 Simulation data of fluorescence images

表 1 拟合误差对比结果

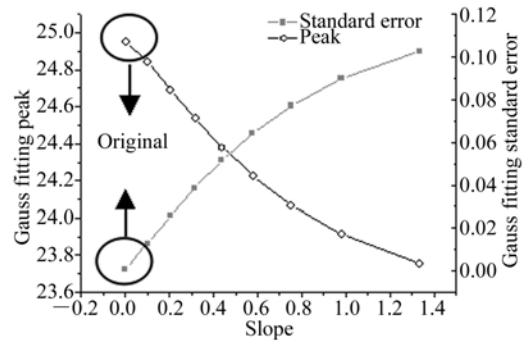
Tab. 1 Comparison of fitting standard errors

No.	Method	Value/pixel	Standard error
1	Gauss fitting	—	—
2	Fitting with window filter	162.525	0.114

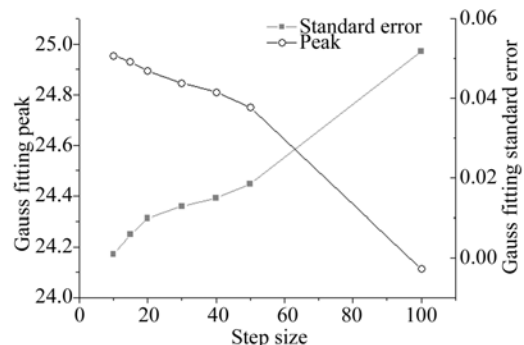
2.4 逐步逼近窗口滤波背景抑制方法的关键参数

2.4.1 步长

分区窗口需保证标记线信号的完整性,因此步长与局部信号的径向分布特征密切相关。当标记线径向分布一致时,步长与分区窗口大小成正比,分区窗口所能滤除的噪声会随着步长的增加而减小。步长一定时,标记线径向斜率(径向夹角)与分区窗口大小成正比,斜率越小,分区窗口的滤波效果越明显。构造加入正态分布白噪声的标记线模拟图像,图 6(a)给出了步长为 20 pixel 时,标记线斜率与高斯拟合精度(分区窗口中轴向坐标为 250 的固定位置)的关系。由图可知,步长一定时,拟合精度随着斜率的增加而降低。



(a) 标记线斜率与高斯拟合的关系
(a)Connection between slope and Gauss fitting error



(b) 步长与高斯拟合的关系
(b)Connection between step size and Gauss fitting error

图 6 不同参数与拟合结果之间的关系

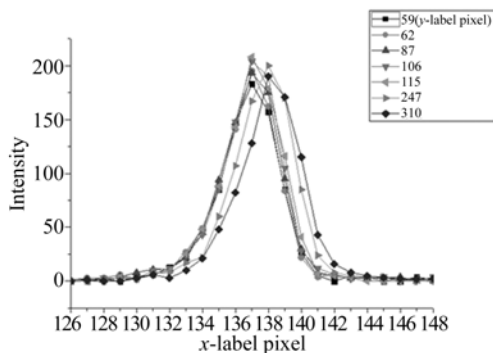
Fig. 6 Connections between parameters and Gauss fitting results

构造一幅加入正态分布白噪声且信号径向分布一致的标记线模拟图像,图 6(b)给出了步长与高斯拟合精度(分区窗口中轴向坐标为 250 的固定位置)的关系。由图可知,斜率一定时,拟合精度随步长的增加而降低。在已知局部信噪比和信号分布特征的情况下,步长增大,分区减少,计算量减小,但分区滤波的去噪能力会随之降低。因此需根据实际情况适当选取步长,在保留有效的 OH 标记线细节的前提下,尽可能地抑制背景噪声。

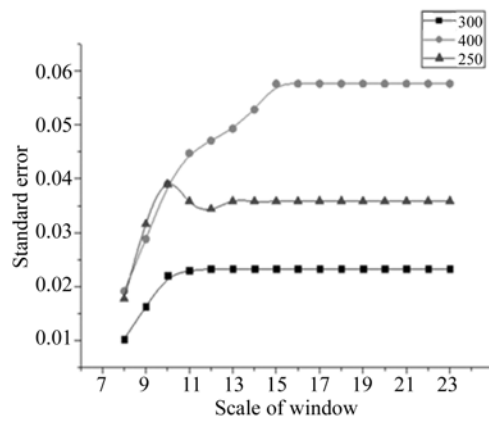
2.4.2 窗口尺寸

逐步逼近窗口滤波背景抑制方法中整体滤波遵循灰度统计原则。分区窗口的选择区别于整体窗口,整体窗口旨在保留完整的信号特征,去除散布在图像中的背景噪声;而分区窗口和步长配合,尽可能包含有效的 OH 荧光信号,保留其细节信息,滤除信号附近的背景噪声。因此步长一定时,分区滤波窗口尺寸的确定与信号识别精度密切相关。

在保证信号完整的前提下,分区窗口尺寸越小,滤除噪声越多。为了提高信号的识别精度,可缩小分区窗口的尺寸;但同时必须保证高斯拟合精度,即在分区窗口中要有足够的有效数据进行高斯拟合。以无流场背景干扰时的初始 OH 荧光信号为例,图 7(a)给出了采集到的初始 OH 图像中荧光信号沿宽度方向的空间分布,标记线所在区域的轴向坐标为(134,142),其中至少包含 8 pixel。实验中拍摄到的荧光图像需要考虑分子扩散和流场干扰的影响,为了保证拟合精度,确定 8 pixel 为分区窗口尺寸的下限。



(a) 荧光信号的轴向空间分布
(a) Axial spatial distribution of fluorescence signals



(b) 窗口尺寸和高斯拟合之间的关系
(b) Connection between window scale and Gauss fitting error

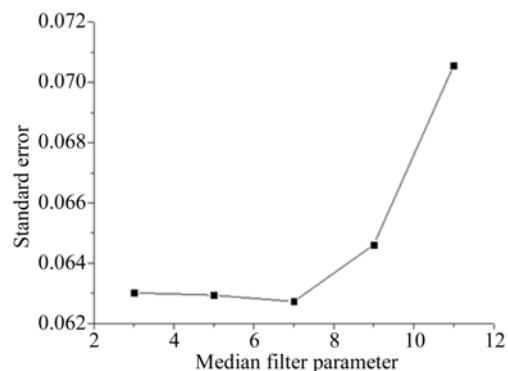
图 7 窗口尺寸的确定

Fig. 7 Calculation of window dimension

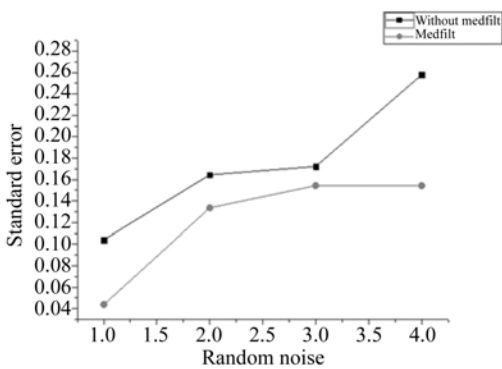
根据窗口滤波方法,整体滤波的窗口尺寸为 16 个像素,分区窗口的确定介于整体窗口和最小窗口之间,其大小和拟合误差成正比,分区窗口越小,去除噪声越多,信噪比越高,计算量也越大,因此针对 3 个不同位置的数据进行窗口滤波处理,窗口尺寸与高斯拟合误差之间的关系如图 7(b)所示,可见在窗口尺寸在 10 pixel 以内,才能保证高斯拟合误差在系统允许的误差范围内。

2.4.3 中值滤波参数

为了进一步提高拟合精度,在提取局部有效信号的基础上进行图像平滑处理。本文采用中值滤波进行空间域减少噪声处理,去除荧光图像的离散噪声信号。实验结果对比如图 8(a)所示,选取 7 pixel 窗口尺寸进行平滑,针对不同噪声密度,对比中值滤波前后的拟合误差结果,如图 8(b)所示。由图可知,中值滤波提高了拟合精度。



(a) 中值滤波参数和高斯拟合误差之间的关系
(a) Connection between median filter parameter and Gauss fitting standard error



(b) 不同噪声密度下中值滤波前后的高斯拟合误差
 (b) Comparison of Gauss fitting errors before and after median filter under different noise densities

图 8 中值滤波参数的确定

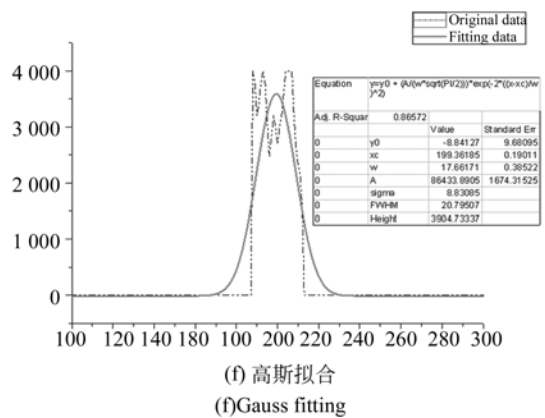
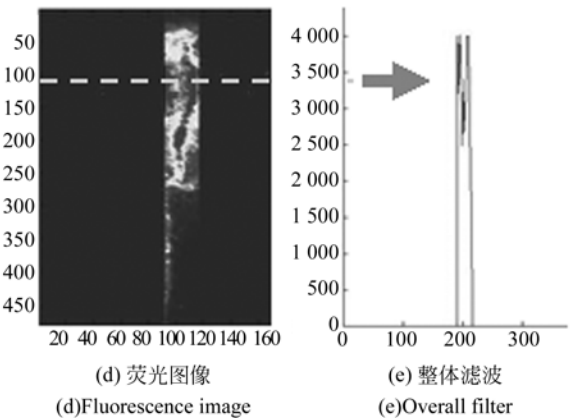
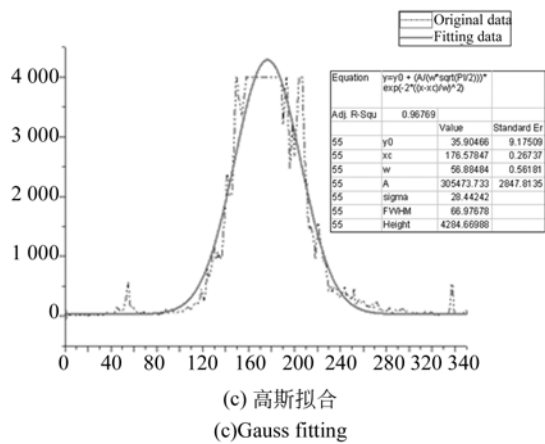
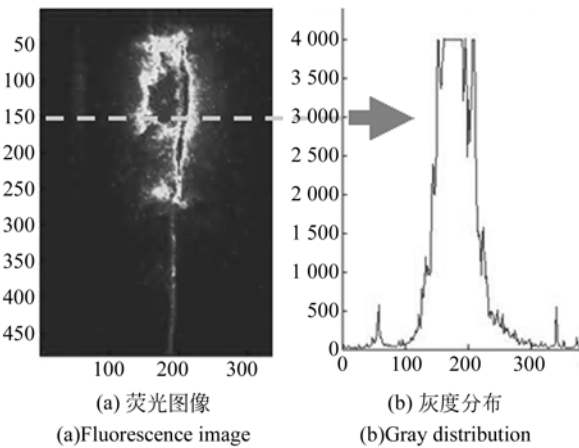
Fig. 8 Calculation of median filter parameter

3 发动机流场速度测量

实验分别采用逐步逼近的特征窗口滤波优化算法、特征窗口滤波以及直接高斯拟合 3 种方法

处理图 4, 并进行了识别效果对比。

由于燃烧区剧烈反应的 OH 信号干扰和流场局部流速差异, 荧光图像如图 9(a) 所示。无背景处理提取到的 OH 分子标记线沿轴向的强度分布见图 9(b), 直接高斯拟合结果见图 9(c), 拟合误差为 0.267 0, 背景噪声严重影响识别结果。通过特征窗口滤波去除背景结果见图 9(d), 此时 OH 分子强度分布见图 9(e), 在特征窗口内沿轴向进行高斯拟合的结果见图 9(f), 拟合误差为 0.190 0。由于背景的特殊性, 这种方法的背景噪声去除效果并不理想。采用逐步逼近分区优化特征窗口滤波算法抑制背景的结果见图 9(g), 此时 OH 分子强度分布见图 9(h), 在每个特征窗口内沿轴向作高斯拟合见图 9(i), 拟合误差为 0.046 4。3 种方法的 OH 标记线拟合误差对比见表 2, 由表可知本文提出的方法大大减小了拟合误差。因此, 当流场因结构变化、湍流等因素造成流道内速度明显变化时, 本文方法可以更好地抑制背景噪声, 并提高信号的识别能力和测速精度。



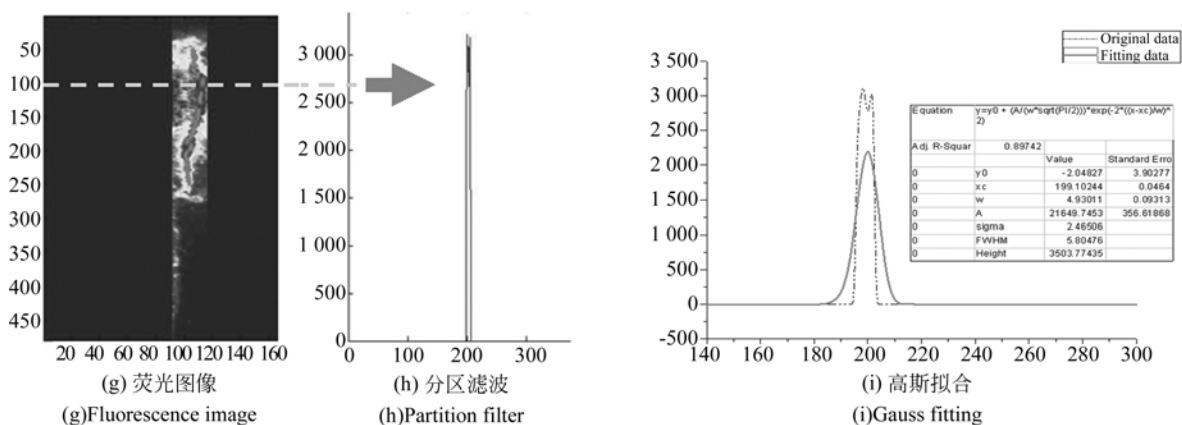


图 9 流速变化下的荧光图像以及处理结果

Fig. 9 Fluorescence images and processing results of tagging line by different methods with change velocity of combustion flow

表 2 拟合误差对比结果

Tab. 2 Comparison of fitting standard errors

No.	Method	Value/pixel	Standard error
1	直接高斯拟合	176.578	0.267
2	窗口滤波	199.362	0.190
3	优化窗口滤波	199.102	0.046

在优化窗口滤波的基础上结合图像分析进行图像处理, 结果如图 10 所示。可见该方法有效地

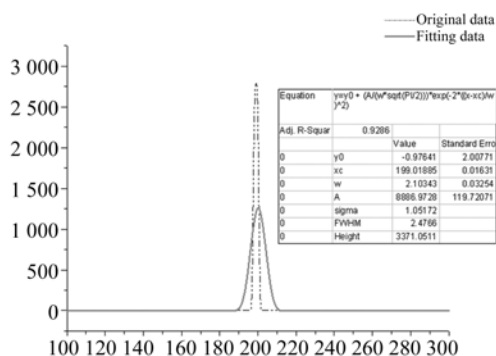


图 10 优化滤波后高斯拟合结果

Fig. 10 Gauss fitting with optimization filter

抑制了噪声, 减小了拟合误差, 提高了精度, 对比结果见表 3。

表 3 拟合误差对比结果

Tab. 3 Comparison of fitting standard errors

No.	Method	Value/pixel	Standard error
1	优化窗口滤波	199.102	0.046
2	优化窗口滤波+图像分析	199.019	0.016

4 结 论

本文针对超音速燃烧流场 HTV 测速时背景噪声干扰严重的问题, 通过分析超音速燃烧平台氢/空气燃烧流场实验得到的羟基标记荧光图像的信号特征以及背景噪声对 HTV 测量精度的影响, 对比了常用的背景抑制方法, 提出了分区滤波逐步逼近的优化背景抑制算法和中值滤波进行平滑的方法。在分析方法可行性以及参数确定的基础上对实验数据进行了处理。实验结果表明, 该方法有效减小了拟合误差, 精确提取了标记线位置, 测速精度提高了 18.8%。

参考文献:

[1] PITZ R W, LAHR M D, DOUGLAS Z W, et al.. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow

over a cavity[J]. *Applied Optics*, 2015, 44(31): 6692-6700.

[2] 王岳, 雷宇, 张培元, 等. 用 OH-PLIF 研究浮力对预混 V 形火焰的作用[J]. *工程热物学报*, 2001, 22(3): 382-385.

- WANG Y, LEI Y, ZHANG P Y, *et al.*. A study of buoyancy influence on premixed V-flames by using OH-PLIF [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(3): 382-385. (in Chinese)
- [3] WEHRMEYER J A, RIBAROV L A, OGUSS D A. Flame flow tagging velocimetry with 193-nm H₂O photodissociation [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(22): 6912-6917.
- [4] HU S T, MOSBACHER D M, WEHRMEYER J A, *et al.*. Simultaneous temperature, species and velocity measurements via combined Raman spectroscopy and HTV [R]. *AIAA*, 2004:4167.
- [5] GRADY N R, FRIEDLANDER T, PITZ R W, *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a piloted cavity [J]. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, AIAA*, 2010:1405.
- [6] 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 284-296.
- LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [7] 叶景峰, 胡志云, 张振荣, 等. 一种提高羟基分子示踪速率测量精度的方法[J]. *激光技术*, 2012, 36(1): 64-66.
- YE J F, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. A method for improving precision of hydroxyl tagging velocimetry[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 64-66. (in Chinese)
- [8] 孙海江, 王延杰, 陈小林. 基于自适应梯度阈值各向异性滤波抑制红外复杂背景[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 146-151.
- SUN H J, WANG Y J, CHEN X L. Suppression of infrared complex background based on adaptive gradient threshold anisotropic filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 146-151. (in Chinese)
- [9] 孙剑明. 应用正则化影响函数扩散模型的星图噪声滤波[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1655-1660.
- SUN J M. Star image noise filtering based on regularization influence function diffusion model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1655-1660. (in Chinese)
- [10] 崔园园, 王伯雄, 柳建楠, 等. 数字超声波信号中有色噪声的自适应滤波[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3377-3383.
- CUI Y Y, WANG B X, LIU J N, *et al.*. Adaptive filtering for colored noise in digital ultrasonic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3377-3383. (in Chinese)

作者简介:



邵 珺(1984—),女,安徽蚌埠人,硕士,工程师,2009年于军械工程学院获得硕士学位,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: shaojun@nint.ac.cn

导师简介:



李景银(1966—),男,教授,博士,1998年于西安交通大学获得博士学位,主要从事流体机械流场计算、优化设计和实验测量方面研究。E-mail: jyli@mail.xjtu.edu.cn