

燃烧流场羟基示踪测速的噪声去除方法

邵珺^{1,2,*}, 叶景峰², 王晟², 胡志云², 方波浪², 张振荣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 为了保证燃烧流场羟基(OH)示踪速度测量的精度,开展了背景噪声去除方法研究。基于燃烧流场羟基示踪测速数据的噪声特性分析,构建了染噪的数值模型;针对局部的燃烧 OH 荧光干扰以及流场杂散光等背景噪声,采用了基于 Hough 变换的空间滤波方法。针对测量系统的物理、电、光以及传感器等噪声,采用了小波变换的噪声去除方法,提高了图像信噪比。提出了一种将两种方法融合的背景去除方法,抑制了系统噪声对空间滤波算法精度的影响,优化了空间滤波结果。研究结果表明,图像处理峰值信噪比提高了 16.79 dB,信噪比提高了 13.91 dB。对燃烧流场实验数据进行了处理,有效地抑制了背景噪声,达到了图像预处理的效果,满足了激光诊断系统对测量精度的要求。

关键词 图像处理; 燃烧流场; 羟基示踪测速; 噪声去除; Hough 变换; 小波变换

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0309001

Background Noise Suppress Method for Hydroxyl Tagging Velocimetry in Combustion Flow Field

Shao Jun^{1,2,*}, Ye Jingfeng², Wang Sheng², Hu Zhiyun², Fang Bolang²,
Zhang Zhenrong², Li Jingyin¹

¹School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

²The State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract In order to guarantee the precision of hydroxyl (OH) tagging velocimetry measurement in combustion flow field, we investigate a background noise removal method. Based on the analysis of noise characteristics of hydroxyl tagging velocimetry experimental data in combustion flow fields, we construct a numerical model of noise attenuation. For the background noise such as local combustion OH fluorescence interference and flow stray light, we adopt a spatial filtering method based on Hough transform. As for the physical, electrical, optical and sensor noises of the measurement system, we present a noise removal method of wavelet transform to improve signal-to-noise ratio. The background noise suppression method combining spatial filtering and wavelet transform is proposed to suppress system noise effect on the spatial filtering algorithm precision, and optimize the spatial filtering results. The research results show that the peak signal-to-noise ratio is improved by 16.79 dB, and signal-to-noise ratio is improved by 13.91 dB after imaging processing. The experimental data of combustion flow field are processed, which effectively suppresses background noise, achieves the effect of image preprocessing, and meets the requirement of measurement accuracy of laser diagnostic system for measurement accuracy.

Key words image processing; combustion flow field; hydroxyl tagging velocimetry; noise removal; Hough transform; wavelet transform

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 120.7250; 350.4600

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-11-10; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(91541203,91641112)、国家重点实验室基金(SKLLIM1808)

* E-mail: shaojun@nint.ac.cn

1 引言

随着航天航空科技的迅猛发展,可对流场内部参数进行精确测量的技术变得十分必要^[1-13]。而羟基(OH)示踪测速(HTV)技术^[14-16]由于具有非接触性,不存在粒子注入的污染、扰动和跟随性的问题,高温下易生成,及寿命长等优势,得到了广泛关注。2010年,Lahr等^[17]利用OH分子标记技术测量了非反应状态下超音速燃烧室凹腔内的速度场分布,根据单脉冲结果得出了平均速度和速度均方根分布情况。Perkins等^[18]用HTV技术获得了燃烧航空煤油的SR30缩比型涡轮发动机和全尺寸J85涡轮发动机的尾流在燃烧充分情况下速度分布情况。本课题组^[19-22]也利用HTV技术测量了超声速流道中速度的分布情况。

HTV图像处理精度是制约其测速精度的关键因素之一。通常HTV技术采用高斯拟合的方式提取信号,计算速度。为了提高低信噪比湍流场的测量精度,1996年Gendrich等^[23]提出了直接相关法,2011年Ramsey等^[24]提出了间接相关方法,2013年van de Water等^[25]提出了主动轮廓法,2015年Sanchez-Gonzalez等^[26]提出了Hough变换方法。

在发动机复杂燃烧场应用中,人们对HTV图

像处理精度和稳健性提出了更高的要求。首先要对HTV测量图像进行预处理,去除背景噪声,提高图像信噪比(SNR, R_{SNR}),才能提高标记线提取精度和速度场计算精度。项目组开展了相关图像预处理的工作^[27-28],主要针对燃流场流速局部突变的情况,采取逐步逼近特征窗口滤波方法进行处理。在后续实验研究中,发现对于湍流场及速度场分布不均匀的情况,此方案的分区窗口过多,运算时间过长。因此,本文采用一种基于Hough变换的空间滤波方法,用Hough变换自动检索线信号的方式,代替手动设定分区窗口,提高运算精度,减少运算时间。同时实验数据中产生的本底背景噪声,会给边缘提取、Hough变换直线检测及信号提取等数据处理算法带来影响,采用小波变换来优化空间滤波的结果。

2 燃烧流场 HTV 测试的背景噪声分析

以中国空气动力发展中心进行的直连式超燃冲压发动机模型实验中利用HTV技术测得的实验数据为例进行背景噪声分析,所得的实验图像如图1所示,其中圈出的区域为背景噪声,图1(a)为燃烧OH_B(OH from Burning)荧光干扰,图1(b)为流场背景噪声,图1(c)为系统噪声。

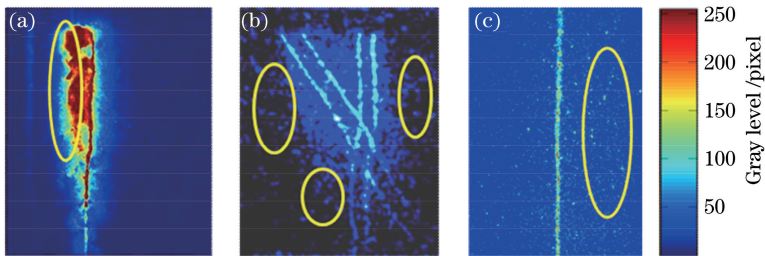


图1 HTV实验图像。(a) OH_B荧光干扰;(b)流场背景噪声;(c)系统噪声

Fig. 1 HTV experimental images. (a) OH_B fluorescence interference; (b) flow field noise; (c) system noise

应用HTV技术时,背景噪声会直接影响信号的 R_{SNR} ,而 R_{SNR} 的降低会使得速度测量不确定度增大, R_{SNR} 降低的原因有两方面。一方面,在复杂燃料的反应流动中,局部OH_B荧光干扰会导致图像 R_{SNR} 降低;存在的大分子燃料(航空煤油等)对解离激光有较强的吸收;为了保障窗口不被激光损伤,需要降低解离激光的能量阈值,降低 R_{SNR} 。另一方面,流场中的各种颗粒物和壁面等对激光的散射,以及反应流场本身存在的中间产物所形成的散射光均会对信号产生较大干扰,造成测量图像 R_{SNR} 降低,进而造成速度测量精度下降甚至测量失败。因此,背景噪声去除是速度精确测量的关键。

本研究采用均方误差(MSE, R_{MSE})、峰值信噪比(PSNR, R_{PSNR})^[29-30]以及 R_{SNR} 来评估噪声。其中 R_{MSE} 表示原图像与噪声图像的像素差平方和的均值, R_{MSE} 越小表示图像质量越好,而 R_{PSNR} 与 R_{MSE} 呈逆相关, R_{PSNR} 越大表示图像质量越好, R_{SNR} 越大表示图像质量越好。

2.1 流场噪声分析与建模

复杂燃烧流场本身存在化学反应,随之产生的中间产物或大颗粒都会产生杂散光。流道内壁面也会引入杂散光。通过搭建流场HTV背景噪声实验装置,如图2(a)所示,可获得测试段HTV数据,其中193 nm激光将流场中的H₂O解离可产生OH

自由基,将 OH 自由基作为标记线,平面激光诱导荧光(PLIF)光条可显示标记线,同时也可清楚地显示流场背景噪声,通过 ICCD(Intensified Charge-Coupled Device)拍摄实验图像,如图 2(b)所示。

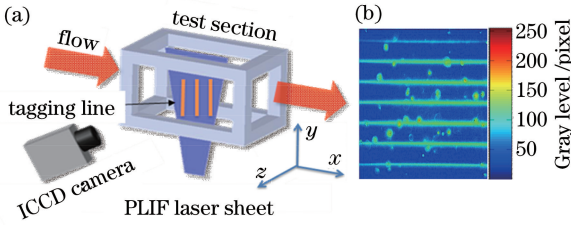


图 2 背景噪声。(a)实验装置示意图;(b)实验结果
Fig. 2 Background noise. (a) Schematic of experimental setup; (b) experimental results

将 ICCD 相机增益调节为实验状态,流场引入的杂散光背景噪声在 PLIF 光条内、外的差别对比如图 3 所示,同时给出了这两种状态下噪声参数的对比结果。从图 3 可以看出,PLIF 光激励会进一步加大背景噪声,而在应用 HTV 技术进行测速时,OH_P(OH from Photo-Dissociation)也存在于 PLIF 光条内,也就是说围绕着信号的背景噪声会更大。

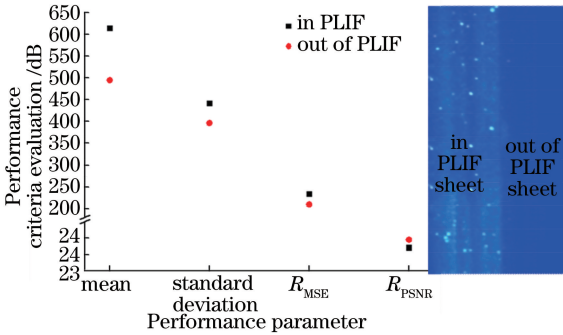


图 3 PLIF 光条内外的背景噪声对比

Fig. 3 Contrast of background noise in and out of PLIF display sheet

基于此构建背景噪声下信号的仿真图像,如图 4 所示。图中曲线是表示燃烧场速度测量的 OH_P 的标记线,周围的不规则斑点代表来自于流场中的各种颗粒物和壁面等对激光的散射,以及反应流场本身存在的中间产物所形成的杂散光,属于流场背景噪声。

2.2 系统噪声分析与建模

系统噪声包括光子噪声、暗电流噪声、固定模式噪声、放大器噪声、成像噪声及传感器噪声等。ICCD 工作状态设置与发动机现场测量时的保持一致,亮度增益为 5000 dB,图像像素为 1024 pixel×1024 pixel,成像倍率为 10 pixel/mm。在这种状态下采集 ICCD 的背景噪声,结果如图 5 所示,绿色区域为 ICCD 拍摄

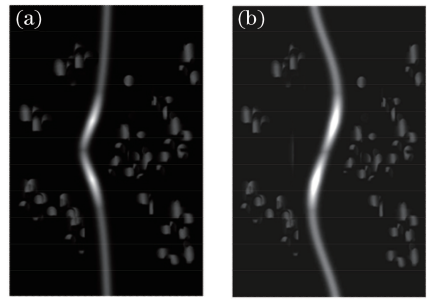


图 4 背景噪声下的仿真模型图像。(a)拐点为奇数的仿真模型;(b)拐点为偶数的仿真模型

Fig. 4 Simulation images with background noise. (a) Simulation model with odd inflection points; (b) simulation model with even inflection points

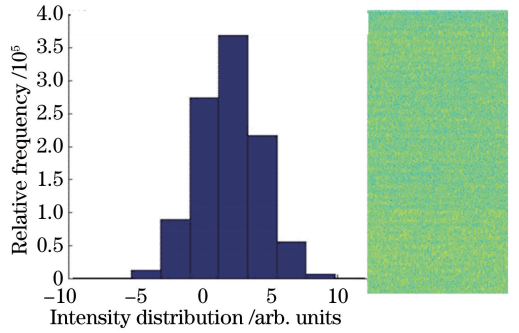


图 5 背景噪声直方图

Fig. 5 Background noise histogram image

的图像噪声图。

获得的噪声大致呈高斯型分布,概论密度函数可表示为

$$p(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(d-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中: d 表示灰度值, μ 表示 x 的均值, σ 表示 d 的标准差。其特点是图像中的每个点都会受其干扰且其幅值是随机的。调整 ICCD 的增益系数发现,随着增益的提高,噪声的高斯系数(标准差)也随之增大,如图 6 所示。

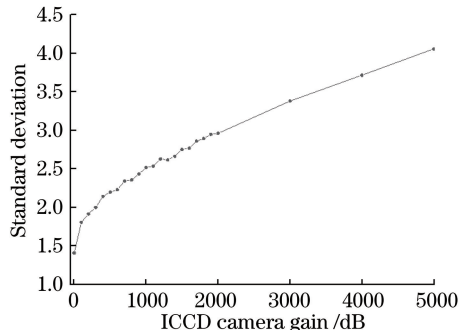


图 6 标准差随增益的变化

Fig. 6 Standard deviation versus gain

对实验数据进行分析识别,计算噪声的标准差,构建系统噪声理论模型。例如,现场实验状态下,将ICCD相机增益设置为5000 dB,计算噪声的标准差,可得 $\sigma=4.06$,构建 $\sigma=4.06$ 的高斯噪声理论模

型,理论结果与实验数据的对比如图7所示。由图7可知,理论结果与实验结果的特性基本一致。因此,可通过改变标准差,构建不同相机增益情况下的噪声模型。

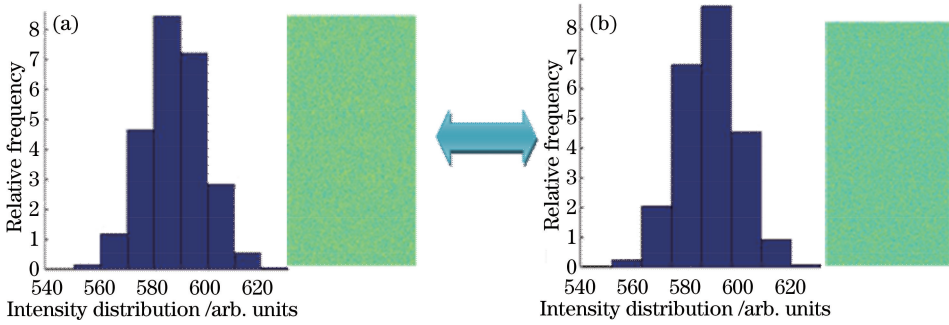


图7 理论结果与实验结果的对比。(a)理论结果;(b)实验结果

Fig. 7 Contrast of simulation results and experimental results. (a) Simulation results; (b) experimental results

从三个方面对燃烧场HTV测量中背景噪声的特性进行归纳分析,如表1所示。1) OH_B 干扰,其特点是能量分布集中,形态特征连续均匀,且并未覆盖 OH_P ; 2) 流场噪声,其特点是能量较高且分散,形态特征随机离散,分布于整幅图像中,在围绕着 OH_P 的 PLIF 光条中更为明显; 3) 系统噪声,其特点是呈高斯分布,与前两者相比能量最低,且离散分布于整幅图像中。

对于 HTV 技术而言, OH_P 边缘信息对测速至关重要,图像预处理不仅要把背景和信号区分出来,还要保留 OH_P 的边缘信息。因此,根据前两种噪声与 OH 标记信号的形态分布不同的特点,采用基于 Hough 变换的空间滤波法有效分割图像,既能保留信号的完整性,又能滤除噪声。同时,采用小波变换去除系统噪声,优化空间滤波结果。处理方法如表2所示。

表1 背景噪声的特性分析

Table 1 Characteristic analysis of background noise

Noise type	OH_B interference	Flow field noise	System noise
Morphological characteristic	Concentrated	Discrete	Discrete
Power	Highest, concentrated	Higher, dispersed	High, dispersed
Position space	In PLIF display sheet, uncovered the signal	Distributed throughout the image, especially in the PLIF display sheet	Distributed throughout the image
Existing reason	Occured in areas of combustion or chemical reactions	Caused by scattering of the flow field wall or other particles	Existed in all experimental images

表2 背景噪声的处理方法

Table 2 Background noise processing methods

Method	Spatial filter based on Hough transform	Wavelet transform
Feature	Less calculation, can segment different morphology distribution images	Can remove Gaussian noise of image
Applied object	Stray light in flow field and uncovered signal combustion interference	Sensor noise including physical noise, random noise and so on
Disadvantage	Not suitable for suppressing background of signal covered by interference	Not suitable for interference and noise from combustion flow field
Solution	When removing background noise, combines with wavelet transform	Optimizes spatial filter

3 原理方法

3.1 基于 Hough 变换的空间滤波

基于 Hough 变换的空间滤波法分以下 4 步。

1) 灰度统计,对图像 L 进行 y 方向的灰度统计;将图像 L 表示为 $M \times N$ 像素大小的二维数据 $f_L(x, y)$,其中 x, y 为二维数据的坐标, y 方向灰度统计结果为

$$g(x, y) = \sum_{x=1}^M f(x, y), y = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (2)$$

式中: f, g 表示灰度值。

2) 空间滤波:基于 OH 分子标记线信号分布特点,通过计算,获取灰度统计的最大值 $g_{\max}(x, y)$ 所在的列 h ,将其设定为特征窗口的中心位置,

3) 设置窗口尺寸为 w 进行滤波去噪,可得 $f(x, y)$,确定图像处理后感兴趣区域(ROI)图像 L_R ;

4) 逐步分区窗口滤波:根据标记线信号局部特征和分布特性,自适应分区处理;为了进一步分割噪声与信号,分 5 步在每个分区窗口中抑制噪声:a)卷积去噪,b)梯度计算,c)边缘检测,d)Hough 变换,e)自适应分区窗口滤波。

卷积去噪 用高斯滤波器平滑图像。

梯度计算 用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向,计算出高斯平滑后图像 L_G 。每一点的局部梯度幅值和梯度方向,对梯度幅值进行非极大值抑制以产生细化的边缘,用双阈值算法检测和连接边缘,从而得到边缘图,假定一个像素 p_1 ,将像素 p_1 与沿着梯度方向的像素 p_2 进行比较。当 p_1 的梯度幅值 $L_{p_1} \leq L_{p_2}$ 时, $p_1 = 0$;当 $L_{p_1} > L_{p_2}$ 时, $p_1 = p_1$, p_1 就是其梯度方向上梯度局部最大的点,这样可以获得梯度幅度图像的边缘图像 L_1 。

边缘提取 在 L_1 中设置归一化后的分割阈值 T ,其中 T 包含两个元素的阈值,分别是低阈值 T_l 和高阈值 T_h , $T_l = 0.26$, $T_h = 0.65$, ($0 < T_l = 0.4T_h < 1$),采用具有高定位精度、低误码率和抑制虚假边缘优点的 Canny 算子进行边缘检测,提取到图像的边缘 L_C 。

Hough 变换检测 对 L_C 进行二值化变换,得到图像 L_B ,对图像 L_B 执行 Hough 变换,得到 Hough 矩阵 L_H ,在矩阵中寻找峰值点 L_P ,在图像 L_B 中提取直线段。

自适应分区窗口滤波 包括分区窗口位置和尺寸的确定。窗口的中心位置是在 Hough 变换提取

直线的基础上对 y 方向作灰度统计。图像 L_B 中提取任意一个线段 I ,假定线段的端点坐标为 (x', y') , (x'', y'') ,通过计算灰度统计结果 $g(x, y)$,对比得到最大值 $g_{\max}(x, y)$ 所在的列 r ,即可获得分区窗口中心位置 $[I_{x',r}, I_{x'+1,r}, \dots, I_{x'',r}]$;窗口的尺寸大小可在 Hough 变换直线提取的基础上计算得到。在 $(0, t)$ 范围内设置分区窗口大小为 w ($0 < w < t$),进行滤波去噪,得

$$\hat{f}(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & x \in (x', x' + t), y \in (r - w, r + w) \\ 0, & x \notin (x', x' + t), y \notin (r - w, r + w) \end{cases} \quad (3)$$

计算 $h(x, y) = \sum_{x=x'} \sum_{y=y'} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2$,得到 $h(x, y)$ 最小时的 $\hat{f}(x, y)$,相对应的 w 为确定的分区窗口尺寸,对分区进行滤波去噪。

采用基于霍夫变换的空间滤波法进行去噪时,分区窗口的数量会影响去噪效果。通过对构建的仿真模型[图 8(a)和 8(b)]进行分析可得,两个模型的 R_{SNR} 相同,信号的形态不同,图 8(a)中拐点是奇数,图 8(b)中拐点为偶数。采用上述方法进行去噪,给出 $R_{\text{MSE}}, R_{\text{PSNR}}$ 的评估结果。在图 8(a)模型中设定 5 个分区窗口时,滤波去噪效果最佳;在 8(b)模型中设定 6 个分区窗口时,滤波去噪效果最佳。

构建不同斜率和拐点数量的仿真模型。图 8(c)所示为不同模型滤波去噪时的分区窗口数量。对于斜率不同的模型,斜率越大,窗口数量越多,去噪效果越好;对曲线而言,拐点数越多,窗口数量较多,去噪效果越好;同时,拐点是偶数的,窗口数量为偶数时,去噪效果好;拐点是奇数的,窗口数量为奇数时,去噪效果好。

计算得到分区窗口尺寸 $w_p = 51$ pixel。图 8(d)所示为不同尺寸的分区窗口的滤波去噪效果,当 $w_p < 51$ pixel,信号特征有所损失;当 $w_p > 51$ pixel,在滤波去噪过程中会引入过多的背景噪声,导致滤波效果下降。因此 $w_p = 51$ pixel 时,去噪效果最佳。

采用空间域变换背景进行抑制处理时,分区窗口数量的设定会影响到去噪效果。分区窗口划分时要遵循三个原则。

1) 遵循奇对奇,偶对偶的原则,即标记线信号存在奇数个拐点,就设置奇数个分区窗口,同样偶数个拐点,设置偶数个分区窗口;

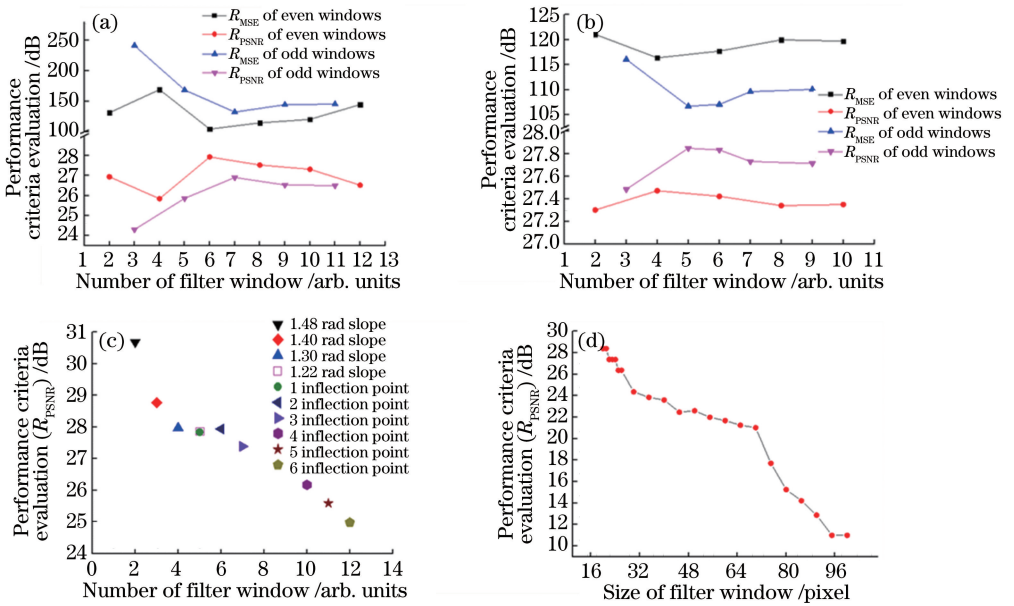


图 8 仿真模型不同参数下的去噪结果对比。(a)拐点为奇数时不同窗口数量下去噪结果对比；(b)拐点为偶数时不同窗口数量下去噪结果对比；(c)不同信号模型下去噪结果评估；(d)不同窗口尺寸下去噪结果评估

Fig. 8 Contrast of de-noising results of different parameters of simulation models. (a) Contrast of de-noising results with different window numbers with odd number of inflection points; (b) contrast of de-noising results with different window numbers with even number of inflection points; (c) evaluation of de-noising results of different signal models; (d) evaluation of de-noising results with different window sizes

2) 遵循直则少,曲则多的原则,即图像中 OH 分子标记线信号垂直方向上斜率越大,窗口分区越多,窗口越密集,拐点越多,设置的分区窗口越多;

3) 遵循两者兼顾的原则,分区窗口滤波的尺寸和数量都要适当,过大和过多的分区窗口必然会引入大量的背景噪声,噪声也没有得到有效抑制;分区窗口过小和过少时,有效信号的损失也会明显增加。因此,窗口尺寸的选择以能兼顾两者为佳,再逐步完

成分区滤波。

构建的染噪模型如图 9(a)所示。灰度统计所确定图像处理后的 ROI 如图 9(b)所示。对提取的边缘图像进行 Hough 变换直线检测,结果如图 9(c)所示。逐步完成分区窗口空间滤波,获得的去噪后的图像如图 9(d)所示。处理前后,图像中的噪声基本滤除,边缘信息并未损失, R_{MSE} 减少了 88.13%, R_{PSNR} 提高了 9.26 dB, R_{SNR} 提高了 9.24 dB。

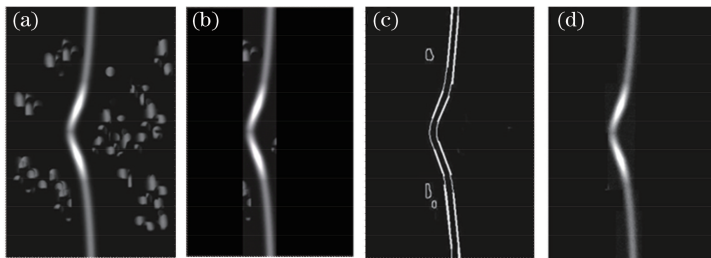


图 9 染噪模型的去噪结果。(a)染噪模型；(b) ROI；(c) Hough 检测；(d)分区滤波

Fig. 9 De-noising results of noise model. (a) Noise model; (b) ROI; (c) Hough detection; (d) partition filtering

3.2 小波变换方法

实验系统噪声的空间域很难分割,对于这种非平稳、非线性信号,小波变换以其时频域局部化和多分辨率的性能,可有效地去除这种噪声。小波变换的参数选择包括阈值、分解层数及迭代次数等。一般来说,噪声越大,分解层数越多,迭代次数多。

为了避免出现过度平滑现象,需要综合考虑细节模糊,及边缘信息丢失的情况。

构建的原始信号模型和染噪模型 ($R_{PSNR} = 17.15$ dB, $R_{SNR} = 13$ dB),如图 10(a)和 10(b)所示。通过调整染噪模型小波变换时的参数,对比去噪效果,确定小波参数。

采用小波基 *coif5*, 分解层数为 4, 对比不同阈值函数的小波去噪后的 R_{PSNR} , 如图 10(c) 所示。软阈值为 0.003 时, 去噪效果最好。

采用小波基 *coif5*, 软阈值 0.003, 对比不同分解层数小波去噪后的 R_{PSNR} , 如图 10(d) 所示。分解层数为 4 时, 去噪效果最好。

采用小波基 *coif5*, 软阈值 0.003, 分解层数为 4, 对比不同迭代次数的小波去噪后的 R_{PSNR} 结果, 如图 10(e) 所示。迭代次数为 8 时, R_{SNR} 提高 46%, R_{PSNR} 提高 29%, 去噪效果最好。较迭代一次的小波去噪后的 R_{SNR} 提高了 0.28 dB, 总体去噪能力相差不多, 综合考虑运算量和运算时间, 选三次迭代。

选取的小波变换参数如下: 小波基 *coif5*, 软阈值为 0.003, 分解层数为 4, 迭代次数为三, 对比不同

R_{SNR} 的染噪模型小波去噪后结果, 如图 10(f) 所示。当 $R_{SNR} \leq 30$ 时, 采用上述方法去噪效果较好, R_{SNR} 至少提高 30%; 其中 $R_{SNR} \leq 4$ 时, 噪声干扰较大, 虽然上述方法也能将 R_{SNR} 提高 3~6 倍, 但是去噪后的图像与原始图像仍能用肉眼区分出来; 而当 $6 \leq R_{SNR} \leq 20$, 去噪效果明显, 用肉眼基本区分不出去噪后的图像与原始图像; 当 $R_{SNR} > 30$ 时, 图像受噪声干扰小, 质量较好, 但小波变换也会让图像的细节模糊, 信息丢失。

因此, 本研究选择小波基 *coif5* 和小波分解层数 4, 运用分解算法将含噪声的图像进行 4 层小波分解, 可得到相应的小波分解系数; 设置阈值函数为 0.003, 获取去噪后的图像 L_w , 最后输出背景抑制后的图像信息 L_o , 从图 10(g) 可以明显看出小波去噪后的效果。

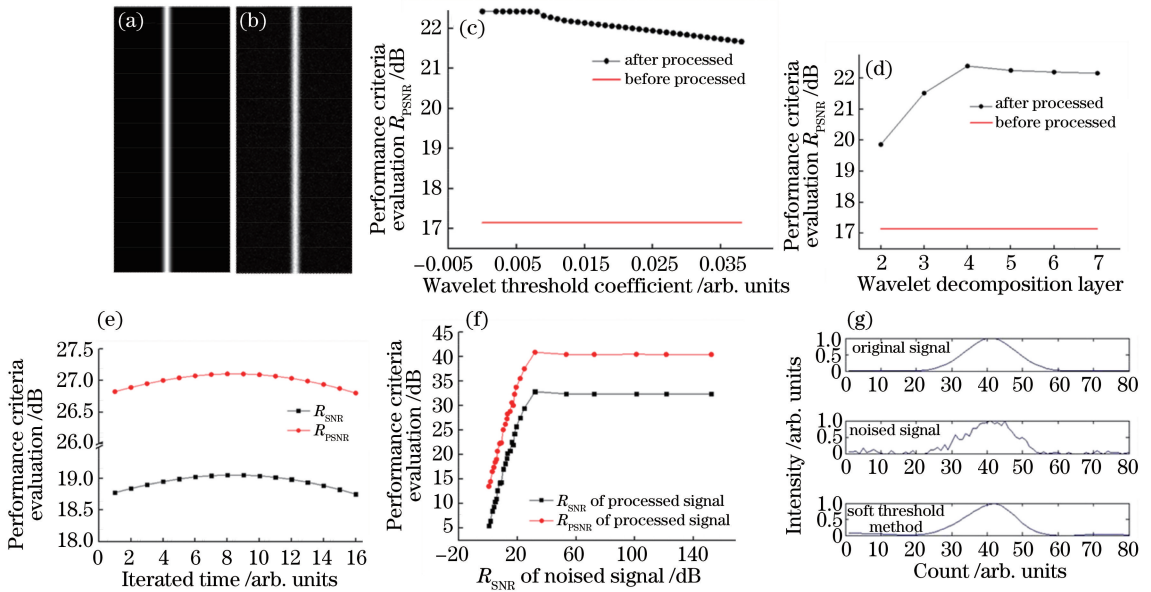


图 10 小波变换的去噪分析。(a)模型;(b)染噪模型;(c)小波阈值系数与 R_{PSNR} 的关系;(d)小波分解层数与 R_{PSNR} 的关系;(e)迭代次数与 R_{PSNR} 的关系;(f)染噪信号的 R_{SNR} 与去噪后信号的 R_{SNR} 和 R_{PSNR} 的关系;(g)小波处理过程

Fig. 10 De-noising analysis of wavelet transform. (a) Model; (b) noised model; (c) R_{PSNR} versus wavelet threshold coefficient; (d) R_{PSNR} versus wavelet decomposition layer; (e) R_{PSNR} versus wavelet iterated time; (f) R_{PSNR} , R_{SNR} of de-noised signal versus R_{SNR} of noised signal; (g) wavelet transform processing

3.3 背景去除方法

燃烧流场 HTV 测量图像中往往既存在系统噪声, 又存在流场噪声, 甚至还存在局部燃烧荧光干扰。本研究提出一种将两种方法相结合的图像预处理方法。采用基于 Hough 变换的空间滤波法去除流场噪声和燃烧干扰。其中, 考虑到系统噪声对边缘提取、霍夫变换、直线检测及信号提取等数据处理精度的影响, 采用小波变换来优化基于 Hough 变换的空间滤波算法, 进行基于 Hough 变换的空间滤

波。在确定的 ROI 里, 采用小波变换去噪, 提高边缘提取、Hough 变换以及直线检测等的精度, 优化空间滤波算法。算法步骤如图 11 所示。

对比常用去噪方法如高斯平滑、中值滤波、拉普拉斯锐化和本研究提出方法的去噪效果, 通过主观评价的方式, 观察分析背景抑制效果, 如图 12 所示。图 12(a) 为构建的染噪模型。根据常用的去噪方法, 如图 12(b) 的高斯平滑、图 12(c) 的中指滤波、图 12(d) 的拉普拉斯锐化, 分别进行处理的结果可

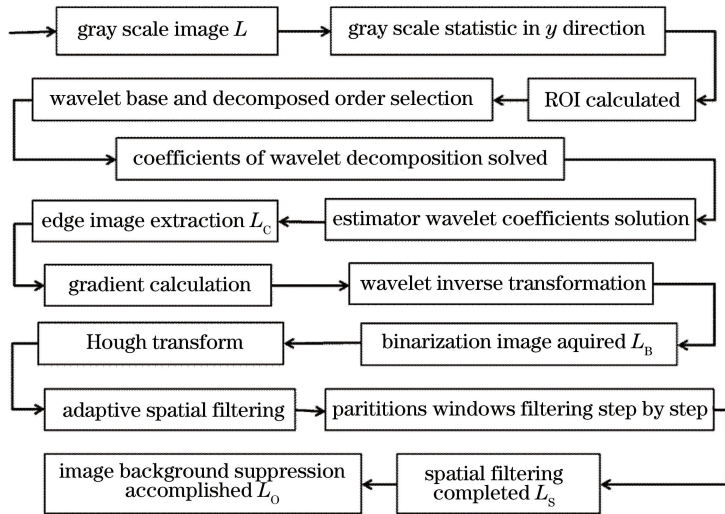


图 11 图像预处理方法的流程框图

Fig. 11 Flow diagram of image preprocessing

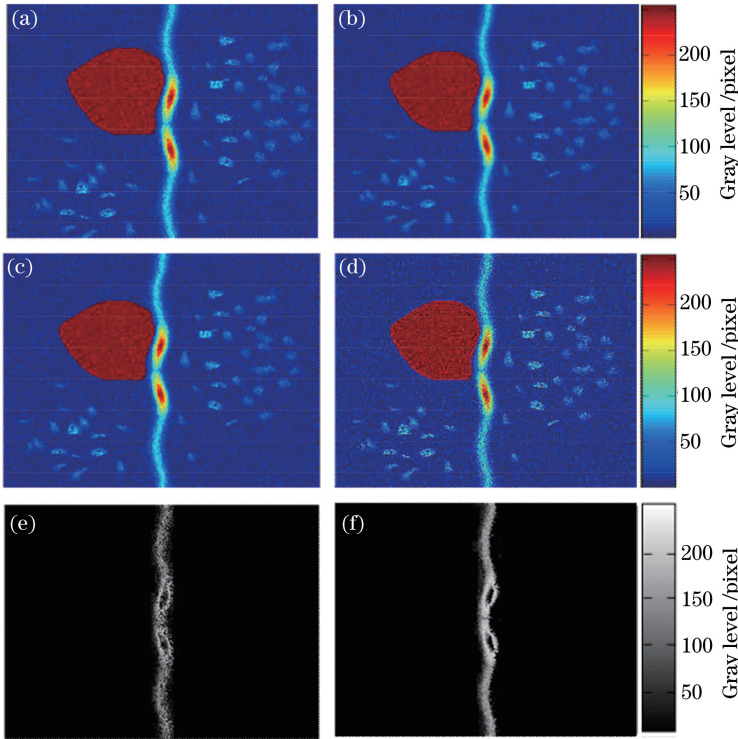


图 12 仿真去噪效果的对比。(a)染噪模型;(b)高斯平滑;(c)中值滤波;(d)拉普拉斯锐化;(e)空间滤波;(f)所提方法

Fig. 12 Contrast of simulation de-noising results. (a) Noised model; (b) Gaussian smoothing; (c) median filtering;

(d) Laplace sharpening; (e) spatial filtering; (f) proposed method

以看出,图像中的背景干扰并未消除。图 12(e)所示为采用空间滤波的结果,干扰得到有效抑制,信号边缘信息并未丢失,但仍然存在背景噪声。图 12(f)所示为小波变换优化后的结果,包括背景噪声都基本被滤除。

根据 R_{PSNR} 、 R_{SNR} 、 R_{MSE} 以及位置提取误差 (PDE) R_{PDE} 这 4 种客观方式对去噪结果进行评估对

比,如表 3 所示。构建 $R_{PSNR} = 11.91$ dB, $R_{SNR} = 0.66$ dB, $R_{MSE} = 4.19 \times 10^3$ dB, $R_{PDE} = 28.61\%$ 的染噪模型。其他去噪方法的处理结果: R_{PSNR} 平均提高了 1.68 dB, R_{SNR} 平均提高了 0.65 dB, R_{PDE} 降低了 4.1%;通过基于 Hough 变换的空间滤波对流场中的杂散光进行去除, R_{PSNR} 提高了 14.05 dB, R_{SNR} 提高了 8.75 dB, R_{MSE} 也大大降低,所提算法的去噪效果明

显优于其他算法;因为系统噪声直接影响到边缘提取和 Hough 变换的精度,采用小波阈值变换与基于 Hough 变换的空间滤波相结合的优化方法,进一步降低了 R_{MSE} , R_{SNR} 提高了 54%, R_{PSNR} 提高了 11%。最终使得背景抑制后的图像的 R_{PSNR} 提高了 16.79 dB, R_{SNR} 提高了 13.91 dB, R_{PDE} 改善了 97.4%。

针对复杂燃烧流场速度测量实验图像中的背景

干扰,采用常用图像去噪的方法并不能有效地抑制背景,且存在边缘模糊的可能,正因为信号的边缘信息对于 HTV 测速而言是至关重要的信息,所以不适当的背景去除方法不但不能抑制干扰,还有可能会增加提取难度。对于复杂燃烧场的背景干扰而言,本研究提出的方法则可以在抑制背景的同时规避这些风险。

表 3 去噪效果对比

Table 3 Contrast of de-noising results

Method	R_{PSNR}/dB	R_{SNR}/dB	R_{MSE}/dB	$R_{PDE}/\%$
Original image	11.9121	0.6626	4.1867×10^3	27.12
Gaussian smoothing	14.0240	1.2696	2.5744×10^3	26.45
Median filtering	13.7175	1.2129	2.7627×10^3	26.84
Laplace sharpening	13.0269	1.4407	3.2388×10^3	26.97
Spatial filtering	25.9605	9.4139	164.8278	0.846
Spatial filtering & wavelet function	28.7014	14.5683	87.6880	0.711

4 实验验证

HTV 测量系统由作为 HTV 标记光源的 ArF 准分子激光器、PLIF 光源的 YAG+染料激光器系统、ICCD 相机、光路以及其他配套装置组成。HTV 测量实验分别是在西北工业大学的直联式超音速燃烧发动机试验台上和中国空气动力研发中心的中等尺度直联式超燃发动机模型上开展的,实验现场如图 13 所示。文中分析的实验数据都以现场测量的典型结果为对象。

由于实验拍摄的图像本身就存在背景干扰,没有原始信号图像作对比,所以采用主观评价的方式观察分析去噪效果。以实验图像为例,采用常用去噪方法(平滑、滤波、锐化)与所提方法进行去噪,对

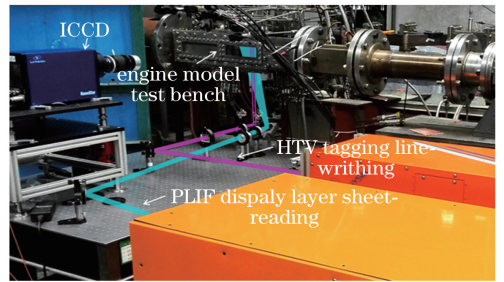


图 13 实验现场照片

Fig. 13 Experimental locale photo

处理结果进行对比,如图 14 所示。从图像对比可以看出,所提方法在针对燃烧场 HTV 背景噪声方面,优于常用的这些方法,不仅保留了信号的有效信息且基本抑制了背景干扰,图像预处理效果优于其他方法。

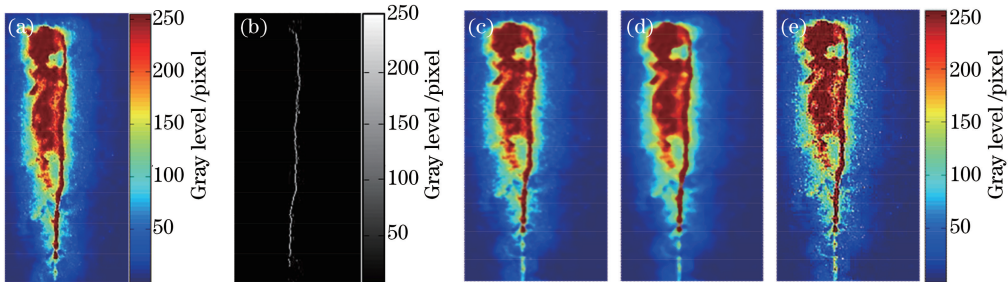


图 14 实验数据去噪结果。(a)实验数据;(b)所提方法结果;(c)高斯平滑结果;(d)中值滤波结果;(e)拉普拉斯锐化结果

Fig. 14 De-noising results of experimental data. (a) Experimental image; (b) proposed method result; (c) Gaussian smoothing result; (d) median filtering result; (e) Laplace sharpening result

5 结 论

HTV 技术是高速高温流场中非常有用的分子

标记速度测量技术。针对在复杂燃烧流场中遇到的实验上很难解决的化学反应发光强干扰和工程应用中强背景噪声问题,本研究从测量原理入手,阐述了

背景抑制对提高测量精度的重要作用。分析了标记图像干扰和噪声的来源和特征,构建了干扰噪声模型。并依此综合运用差分变换、小波变换及空间滤波等方法,建立复杂燃烧场 HTV 图像预处理方法。采用所提方法处理后,图像的 R_{PSNR} 提高了 16.79 dB, R_{SNR} 提高了 13.91 dB, R_{PDE} 改善了 97.4%。实验结果证明,采用所提方法进行去噪达到了图像预处理的效果,基本满足了燃烧流场参数精确测量的要求。

参 考 文 献

- [1] Gendrich C P, Koochesfahani M M, Nocera D G. Molecular tagging velocimetry and other novel applications of a new phosphorescent supramolecule [J]. *Experiments in Fluids*, 1997, 23(5): 361-372.
- [2] Dam N, Klein-Douwel R J H, Sijtsma N M, *et al.* Nitric oxide flow tagging in unseeded air [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(1): 36-38.
- [3] Michael J B, Edwards M R, Dogariu A, *et al.* Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(26): 5158-5162.
- [4] Ribarov L A, Wehrmeyer J A, Hu S, *et al.* Multiline hydroxyl tagging velocimetry measurements in reacting and nonreacting experimental flows [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(1): 65-74.
- [5] Pan F, Sánchez-González R, McIlvoy M H, *et al.* Simultaneous three-dimensional velocimetry and thermometry in gaseous flows using the stereoscopic vibrationally excited nitric oxide monitoring technique [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1376-1379.
- [6] Si Hadj Mohand H, Frezzotti A, Brandner J J, *et al.* Molecular tagging velocimetry by direct phosphorescence in gas microflows: Correction of Taylor dispersion [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 83: 177-190.
- [7] Chen F, Liu H, Li H X, *et al.* An experimental investigation with molecular tagging technique on the spray flow ejected from an air-blast nozzle [C] // *AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, Washington, D. C. Reston, VA: AIAA, 2015: 2016-3251.
- [8] Zhang Z R, Zhu F, Li G H, *et al.* Research on spontaneous Raman scattering excited by XeF(C-A) laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (11): 1114001.
张振荣, 朱峰, 李国华, 等. 基于 XeF(C-A) 激光激励的自发拉曼散射技术研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1114001.
- [9] Zhang L R, Hu Z Y, Ye J F, *et al.* Mobile CARS temperature measurements at exhaust of supersonic combustor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (4): 0408007.
张立荣, 胡志云, 叶景峰, 等. 移动式 CARS 系统测量超声速燃烧室出口温度 [J]. *中国激光*, 2013, 40 (4): 0408007.
- [10] Wang S, Shao J, Li G H, *et al.* Multi-point velocity measurement of gas flow field based on detecting the Doppler frequency shift of molecular rayleigh scattering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (10): 1015002.
王晟, 邵珺, 李国华, 等. 基于检测分子瑞利散射光多普勒频移的流场多点速度测量 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1015002.
- [11] Tao B, Ye J F, Zhao X Y, *et al.* Temperature measurement of instantaneous supersonic flow based on absorption spectroscopy technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1215002.
陶波, 叶景峰, 赵新艳, 等. 基于激光吸收光谱技术测量瞬态超声速流场温度 [J]. *中国激光*, 2011, 38 (12): 1215002.
- [12] Zhang S H, Yu X L, Yan H, *et al.* Molecular tagging velocimetry of NH fluorescence in a high-enthalpy rarefied gas flow [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 122.
- [13] Raffel M, Willert C E, Wereley S T, *et al.* Particle image velocimetry. A practical guide [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [14] Ribarov L A, Wehrmeyer J A, Pitz R W, *et al.* Hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in experimental air flows [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2002, 74(2): 175-183.
- [15] André M A, Bardet P M, Burns R A, *et al.* Development of hydroxyl tagging velocimetry for low velocity flows [C] // *AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, Washington, D. C. Reston, VA: AIAA, 2015: 2016-3247.
- [16] Pitz R W, Lahr M D, Douglas Z W, *et al.* Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a cavity [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6692-6700.
- [17] Lahr M D, Pitz R W, Douglas Z W, *et al.* Hydroxyl-tagging-velocimetry measurements of a supersonic flow over a cavity [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 790-797.
- [18] Perkins A N, Ramsey M, Strickland D J, *et al.* Dual-pulse hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in jet engine exhausts [C] // *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Denver, Colorado. Reston, VA: AIAA, 2009: 2009-5108.

- [19] Zhang Z R, Li G H, Ye J F, *et al.* On-line measurement of species concentration in flow field of scramjet engine [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 709-713.
张振荣, 李国华, 叶景峰, 等. 超燃发动机流场组分浓度的在线测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 709-713.
- [20] Li G H, Hu Z Y, Wang S, *et al.* 2D scanning CARS for temperature distribution measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 14-19.
李国华, 胡志云, 王晟, 等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 14-19.
- [21] Ye J F, Hu Z Y, Liu J R, *et al.* Development and application of molecular tagging velocimetry [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(3): 11-17, 61.
叶景峰, 胡志云, 刘晶儒, 等. 分子标记速度测量技术及应用研究进展[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(3): 11-17, 61.
- [22] Ye J F, Shao J, Li G H, *et al.* Vibration disturbance suppression in velocity measurements by hydroxyl tagging velocimetry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1689-1696.
叶景峰, 邵珺, 李国华, 等. 羟基分子标记示踪速度测量中的强振动干扰抑制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1689-1696.
- [23] Gendrich C P, Koochesfahani M M. A spatial correlation technique for estimating velocity fields using molecular tagging velocimetry (MTV) [J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 22(1): 67-77.
- [24] Ramsey M C, Pitz R W. Template matching for improved accuracy in molecular tagging velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(3): 811-819.
- [25] van de Water W, Dam N. How to find patterns written in turbulent air[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(9): 1574-1583.
- [26] Sanchez-Gonzalez R, McManamen B, Bowersox R D W, *et al.* A method to analyze molecular tagging velocimetry data using the Hough transform [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(10): 105106.
- [27] Shao J, Ye J F, Hu Z Y, *et al.* Progressive approach characteristic window filtering for HTV background suppression in supersonic combustion field [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 221-228.
邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 用于超燃流场羟节标记示踪背景抑制的逐步逼近特征窗口滤波[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 221-228.
- [28] Shao J, Ye J F, Li J Y. A background removal approach to the study of hydroxyl tagging velocimetry in supersonic combustion flow [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(11): 2531-2535.
邵珺, 叶景峰, 李景银. 基于燃烧流场 HTV 技术的背景去除方法[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(11): 2531-2535.
- [29] Li S M, Lei G Q, Fan R. Depth map super-resolution reconstruction based on convolutional neural networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1210002.
李素梅, 雷国庆, 范如. 基于卷积神经网络的深度图超分辨率重建[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1210002.
- [30] Yu Q H, Wu D M, Chen F C, *et al.* Design of a wide-field target detection and tracking system using the segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(7): 071101.