

文章编号 1004-924X(2013)07-1858-07

# 瞬态流场定量测量中平面激光诱导荧光图像的降噪

王 晟\*, 张振荣, 邵 珺, 李国华, 胡志云, 叶景峰

(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:** 研究并评价了单幅荧光图像的降噪方法, 以便真实、有效地获得用于瞬态流场测量的荧光图像的流场参数。分析了单幅荧光图像中的噪声来源, 根据对双线测温信息提取的影响程度, 确定米散射强噪声作为主要的滤波对象。分析了不同数字滤波方法的适用范围, 并对丙酮荧光显示的流场图像进行了降噪处理。通过检查荧光图像与滤波处理图像的差值图像中含有荧光图像结构信息的程度评价了降噪效果。比较表明, 形态学开运算图像重构滤波方法对荧光图像中米散射强噪声去除效果较好, 并可较好地保护图像中原有荧光信息的细节。采用形态学开运算图像重构滤波方法对  $Q_2$  (11) 线与  $P_1$  (7) 线激励甲烷/空气预混火焰获得的荧光图像进行处理, 得到了较为平滑的二维温度分布, 测量温度在 2 000 K 左右。结果表明, 形态学滤波方法在瞬态流场定量测量的 PLIF 图像降噪处理方面具有一定的应用潜力。

**关键词:** 荧光图像; 降噪; 平面激光诱导荧光; 定量测量; 灰度形态学图像重构; 差值图像

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1858

## Denoising of PLIF images for flow parameter measurement

WANG Sheng, ZHANG Zhen-rong, SHAO Jun, LI Guo-hua, HU Zhi-yun, YE Jing-feng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,  
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: pplunum1@163.com

**Abstract:** Noise removing methods were analyzed and assessed to obtain real and effective measurement parameters extracted from fluorescent images in flow field measurements. The fundamental principle of Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) quantitative measurement was introduced. On the basis of analyzing the sources and characteristics of noises, some noise removing methods were analyzed and the stronger noise from the Mie scattering was determined as the main filtering target. Different filter methods were analyzed, the flow field image from an acetone fluorescent display was processed by denoising, and the denoise results were assessed by checking the residual amount of fluorescent signals in the image. Analysis shows that the morphological grayscale reconstruction method can not only move the noise effectively, but also can remain detailed information of the fluorescent signal remains with highly fidelity. The fluorescent images of methane/air flame induced by  $Q_2$  (11) and  $P_1$  (7) lines were filtered and 2D distribution of temperature was obtained in 2 000 K. Results show that morphological grayscale reconstruction method has great potential applications to the noise removing of PLIF images in flow parameter measurements.

**Key words:** fluorescent image; denoising; Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF); quantitative measurement; morphological grayscale reconstruction; difference image

收稿日期: 2013-01-06; 修订日期: 2013-01-29.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目 (No. SKLLIM1009-02)

## 1 引言

采用非接触光学诊断技术对各种发动机燃烧流场进行定量测试,获得流场的各种参量信息,对发动机优化设计、仿真模型验证、发动机性能提升以及污染物排放控制等具有十分重要的科学意义和实用价值<sup>[1-2]</sup>。激光诱导荧光技术是流场光学诊断技术的一种,可以用来探测流场中组分浓度及温度等信息,在此基础上建立的平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术可实现二维可视测量,获得丰富而直观信息,是燃烧流场诊断的强有力工具<sup>[3-4]</sup>。

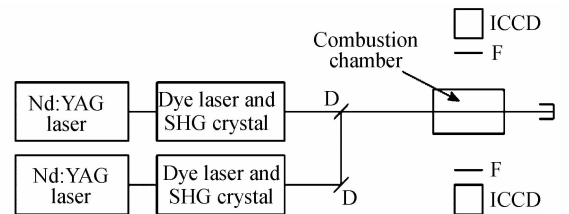
LIF 技术的研究开始于上世纪 80 年代,该技术最先用于探测稳定燃烧场中 OH 的荧光光谱<sup>[5]</sup>。随后,该技术在燃烧诊断中的应用潜力逐渐显现,已用于探测火焰中的一些其它微量组分,如 CH、NO 等。上世纪 80 年代中后期,美国的 Seitzman 和 Hanson 等人采用 PLIF 技术实现了燃烧场微量组分的二维测量<sup>[6]</sup>。随后, Hanson 等人基于双线测温原理,建立了双线 PLIF 实验系统,实现了稳定燃烧场的二维温度场分布测量<sup>[7-8]</sup>。

但 PLIF 技术应用于瞬态流场定量测量时,需要解决许多关键技术,如单幅 PLIF 图像的降噪处理。在对稳定燃烧场测量时,为了减小测量的不确定度,图像处理一般采用多幅图像取平均的方法来匀化噪声,提高信噪比。这种多幅图像取平均的方法并不适用于瞬态流场,因为多幅图像取平均的处理方法要求每次测量的实验状态要基本一致,而瞬态流场为非稳定场,重复性较差,很难保证每次测量的实验状态一致。并且瞬态流场持续时间短(几秒),由于激光器测量重频的限制(10Hz),一次实验只能获得有限的测量图像,而多幅图像取平均的方法至少需要 20 幅以上的图像才有显著效果。针对单幅 PLIF 图像的降噪处理,又不能照搬现有的数字图像滤波工具,因为荧光图像中包含各种噪声,既要有选择的滤除,又不能破坏荧光图像中原有信息的分布,这就对滤波和评价方法提出新的要求。本文针对米散射强噪声,通过对几种常用滤波方法的比较,得出灰度形态开运算学重构滤波方法效果最好,并提出降噪效果的评价方法。最后,通过实验验证了所提

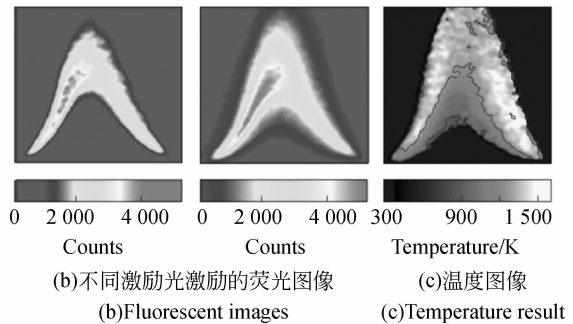
方法的有效性。

## 2 PLIF 技术定量测量原理

激光诱导荧光原理是:采用激光照射燃烧火焰,调整激光的输出频率,使之和待测原子或分子的某一上下能级之间的共振跃迁频率相同,通过共振吸收将待测分子从某一电子基态激励到某一电子激发态,然后激发态的粒子向下跃迁,从而产生荧光信号。PLIF 技术可以通过测量火焰中微量组分的荧光强度,根据玻尔兹曼能量分布公式,推导出火焰的温度分布。在其测温方法中,双线法测温方法可以用于瞬态燃烧场的定量测量,它通过选择 2 条合适的激励线,测量其分别激励的荧光强度比的办法来实现温度测量,其测温过程如图 1 所示。



(a) 实验系统  
(a) Experimental system



(b) 不同激励光激励的荧光图像  
(c) 温度图像  
(b) Fluorescent images (c) Temperature result

图 1 双线 PLIF 测温过程示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for 2-line PLIF

考虑到温度与转动能级的依赖关系,对特定的跃迁  $i$  来讲,其激励的荧光强度可以表示为,

$$F = C_1 I N_T (2J + 1) \exp(-E_i/kT), \quad (1)$$

式中,  $I$  为激光能量,  $C_1$  为实验常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $N_T$  为表示测量区内的总粒子数密度,  $J$  为转动量子数,  $E_i$  为转动能级能量,  $T$  为温度。

如果选择 2 个不同的转动能级(分别用 1 和 2 表示),并测量其荧光强度比  $R$ ,可以得出温度

$T$  值为:

$$T = \frac{-\Delta\epsilon_{12}}{k} / \ln\left(\frac{R}{C}\right). \quad (2)$$

其中,  $\Delta\epsilon_{12}$  表示 2 个转动能级之间的能量差,  $C$  为需要标定的实验常数。

在公式(2)中存在一个假设,即认为在测量过程中,总的粒子数密度  $N_T$  保持不变。对于非稳定燃烧场,满足该条件的前提是能级 1 和 2 之间的测量时间间隔必须足够短(纳秒量级),以使总粒子数在此时间段内来不及变化。因此,对于瞬态燃烧场,利用双线 PLIF 技术测温时,必须有两台激光器及两套测量系统,通过同步控制系统,使两束激光在极短的时间内(约 50 ns)顺序通过燃烧火焰的同一位置,然后利用 2 套不同的测量系统分别测出各自激励的荧光信号。

### 3 PLIF 图像降噪

CCD 图像在采集、编码和传输过程中,均会不同程度地被各种噪声“污染”,这些噪声的大小可分为以下两种:(1)由于 CCD 器件本身问题而产生的,与成像无关的电子噪声;(2)在对物体的入射光线进行光电转换时产生的与成像物体相关的噪声。与 CCD 硬件有关的噪声,可以通过硬件设计的方法来解决,如在硬件上选用降低噪声的工艺和方法<sup>[9]</sup>,而这里考虑的是经过硬件处理过的数字图像,包含与成像有关的噪声干扰,如燃烧场背景辐射、燃烧场中的颗粒物散射激光形成的米散射噪声等。在这些噪声中,米散射噪声具有随机性和强度高的特点,难以采用光路设计或滤光片彻底消除,并且对双线法测温的信息提取影响较大,所以在荧光图像降噪处理时重点考虑的是米散射噪声的消除。

#### 3.1 PLIF 图像降噪方法

在现有的数字图像处理技术中,常用的滤波工具<sup>[10-11]</sup>有均值法、中值滤波法、小波分析等。其中,中值滤波能很好地保护图像边缘,同时去除噪声,对脉冲噪声比较有效;均值平滑处理图像会使图像中的边缘变得模糊,适用于具有白噪声的灰度梯度变化幅度较小的图像,不适用于边缘细节较多、颗粒噪声较大的图像;小波分析属于频域滤波工具,需要假定噪声处在某些频带上,进而对相关频带信息进行选择性地滤除。

作为一种提取图像特征的工具,形态学图像重构最早应用于大地测绘领域,而近年来通过对它的研究发现,它在图像降噪方面也存在应用潜力<sup>[12-13]</sup>。该方法根据图像的分布结构,通过对图像进行形态学算子迭代运算,能够保留图像的总体结构而去掉噪点。图 2 为通过膨胀方法实现重构原理图,图中  $I$  代表原始图像,  $J$  称为标记图像,  $\rho_I(J)$  代表重构图像。对标记图像  $J$  采用膨胀算子迭代直至稳定,最后原始图像  $I$  中的峰在重构图像  $\rho_I(J)$  中被削平,达到降噪目的。基本的形态学算子是腐蚀和膨胀,在腐蚀和膨胀的基础上,可以构造出形态学运算族。其中,开运算先腐蚀后膨胀,可以消除细小突出部分,断开狭窄连接和平滑对象轮廓。米散射噪声在强度上的突出特征符合形态学开运算滤波范畴。

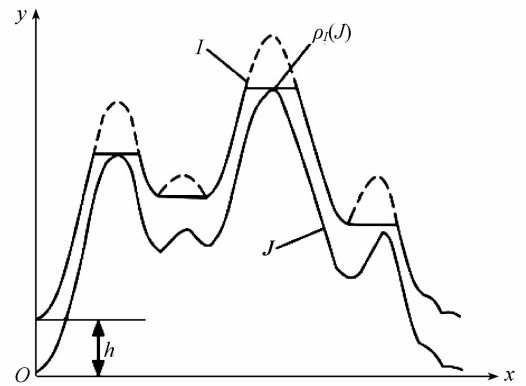


图 2 形态学图像重构示意图

Fig. 2 Schematic of reconstruction for morphological image

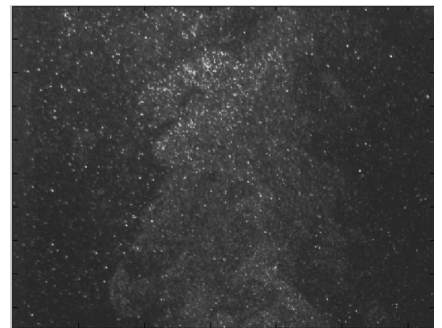


图 3 含有米散射噪声荧光图像

Fig. 3 Fluorescent image with Mie scattering noise

图 3 为采用丙酮作为产生荧光的种子粒子显示喷流结构获得的原始图像。由于丙酮雾化颗粒中含有较大颗粒的丙酮液滴,被 355 nm 激光激

发后产生的米散射亮度很强,导致荧光图像较暗,流场结构不够清晰。图 4(a)-图 7(a)是采用上述滤波工具处理的结果。从图中可以看出,形态学图像重构滤波处理效果最好,结构和细节都保留比较完整,米散射颗粒噪声去除比较干净,中值滤波和均值滤波处理效果次之,小波变换效果最差,这与滤波的频段选择也有关系。

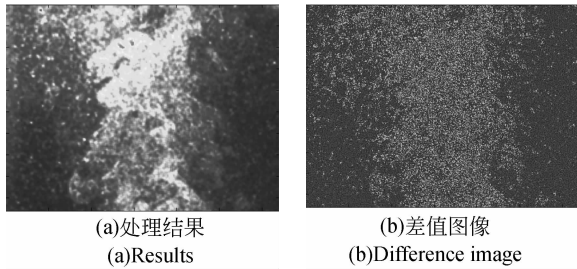


图 4 均值滤波处理结果  
Fig. 4 Results of mean filtering

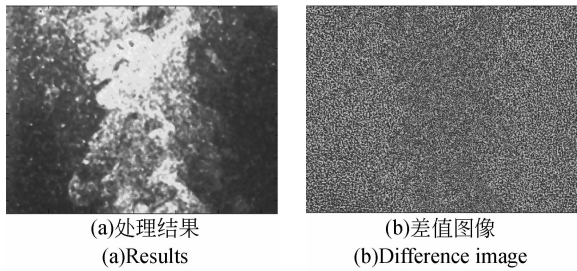


图 5 中值滤波处理结果  
Fig. 5 Results of median filtering

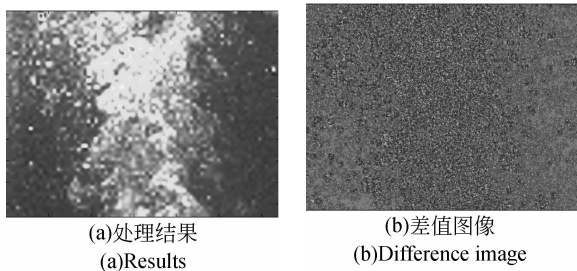


图 6 小波分解与重构滤波处理结果  
Fig. 6 Results of wavelet filter

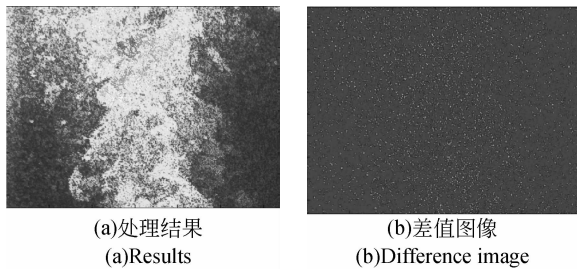


图 7 形态学开运算重构滤波处理结果  
Fig. 7 Results of morphological grayscale reconstruction

### 3.2 评价方法

荧光图像中米散射干扰降噪处理效果的评价属于无参考图像评价<sup>[14]</sup>。目前,对于无参考图像评价还没有一个公认的标准。本文基于人类视觉系统(Human Vision System, HVS),采用差值图像比较的方法<sup>[15]</sup>,通过检查差值图像中含有图像结构信息的程度,检验降噪方法对图像信息的损伤情况。

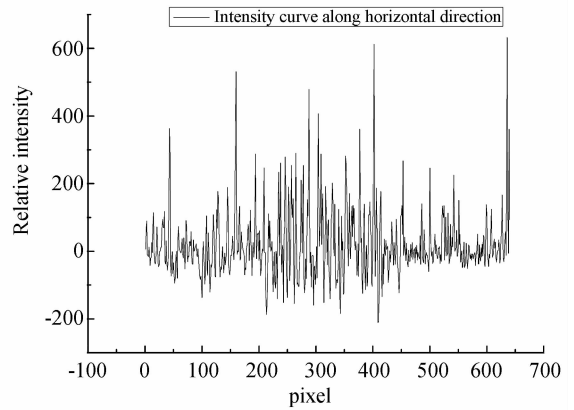


图 8 中值滤波差值图像中水平方向强度分布  
Fig. 8 Intensity curve along horizontal direction of difference image by median filtering

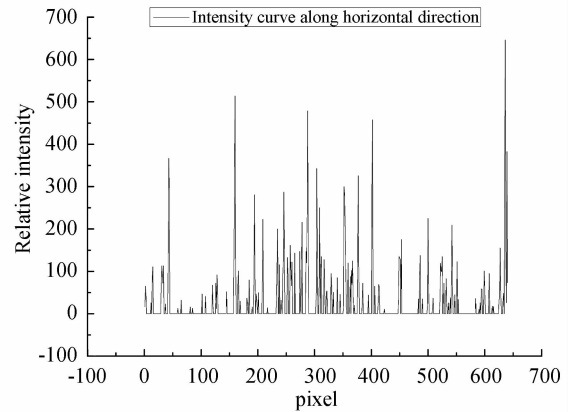


图 9 形态学重构滤波差值图像中水平方向强度分布  
Fig. 9 Intensity curve along horizontal direction of difference image by morphological grayscale reconstruction

图 4(b)-图 7(b)是原始图像与滤波后图像的差值图像,是各种滤波方法处理过的噪声图像。从图中可以看出,除了形态学图像重构滤波,其它滤波工具的差值图像都不同程度地含有原来图像的结构信息。图 8 和图 9 分别为中值滤波和形态

学重构滤波的米散射图像中水平方向上的强度变化曲线,其中波峰代表米散射噪声,波谷强度的大小表示荧光信号强度被改变的多少。中值滤波和形态学重构滤波都能够比较好地滤除米散射噪声,但中值滤波同时改变了原图像中荧光信号的强度,对还原火焰温度的真实性产生了影响,而形态学重构可较好地保护荧光信号。

#### 4 甲烷/空气预混火焰应用

图 10 为选择 OH 基  $A^2 \Sigma^+ \leftarrow X^2 \Pi(1,0)$  跃迁的  $Q_2(11)$  线激励获得的未经滤波的甲烷/空气预混火焰的荧光强度图像,其中含有部分米散射噪声。图 11 为未经滤波的  $Q_2(11)$  线与  $P_1(7)$  线激励的荧光强度图像比较获得的温度结果。从图中可以看出,在很小的区域内温度起伏很大,最高相差 2 000 K。由于激光与流场作用时间很短(约

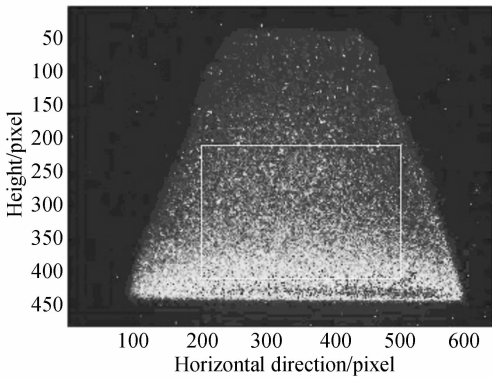


图 10 含有噪声的火焰荧光图像

Fig. 10 Fluorescent image of flame with noise

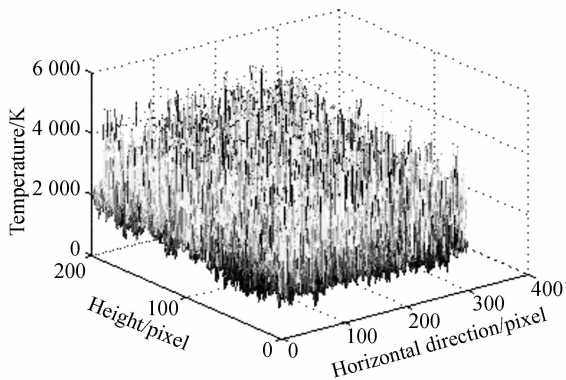


图 11 未滤波的温度结果

Fig. 11 Result of temperature from unfiltered images

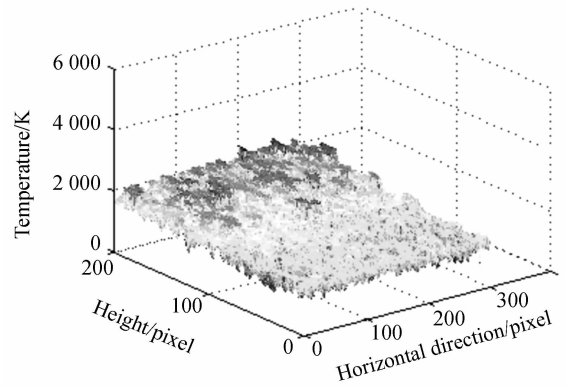


图 12 滤波后的温度结果

Fig. 12 Result of temperature from filtered images

10 ns),在这么短的时间内,流场温度是局部平衡的,温度不会存在如此大的差别,该结果是不真实的。图 12 为采用形态学滤波后获得的温度结果,从图中可以看出,形态学滤波后获得的温度分布更平滑,平均温度在 2 000 K 左右,可以较真实反映火焰本身的温度梯度变化。

#### 5 结 论

针对瞬态流场定量测量的需要,开展了单幅 PLIF 图像降噪方法及评价研究。根据单幅荧光图像的噪声来源和对双线测温方法信息提取的影响程度,确定将米散射强噪声作为主要的滤波对象。比较了均值法、中值滤波法、小波分析、形态学滤波等滤波工具对丙酮荧光图像中噪声的滤波效果,采用差值图像比较方法对滤波结果进行了评价。结果显示,灰度形态开运算学重构滤波方法对于消除荧光图像中的米散射噪声效果最好,同时很好地保护了荧光图像的细节。采用形态学开运算重构滤波方法对  $Q_2(11)$  线与  $P_1(7)$  线激励甲烷/空气预混火焰获得的荧光图像进行降噪处理,信息提取后得到了更为平滑的二维温度分布,测量温度在 2 000 K 左右。结果表明,形态学滤波方法在瞬态流场定量测量的 PLIF 图像降噪处理方面具有一定的应用潜力。

## 参考文献:

- [1] OKOJIE R S, DANEHY P M, WATKINS A N, *et al.*. An overview of NASA hypersonic experimental diagnostic and instrumentation technologies for ground and flight testing [C]. *16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, AIAA 2009-7279.
- [2] 胡志云,刘晶儒,关小伟,等. 燃烧场参数的激光诊断技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 702-706.
- HU ZH Y, LIU J R, GUAN X W, *et al.*. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5):702-706. (in Chinese)
- [3] MEIER U E, WOLFF G D, STRICKER W. LIF imaging and 2D temperature mapping in a model combustor at elevated pressure [J]. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2000, 4:403-414.
- [4] NOREN C A, RANDALL T C, VOROBIEFF P. PLIF visualization and quantitative mixing measurements of a supersonic injection nozzle [C]. *37th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference*, 5-8 June, 2006, San Francisco, California, AIAA 2006-2895.
- [5] CROSLY D R, SMITH G P. Vibrational energy transfer in laser excited  $A^{2+}OH$  as a flame thermometer [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19:517-520.
- [6] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL P H. Planar laser-induced fluorescence imaging of combustion gases [J]. *Appl. Phys. B*, 1990, 50:441-454.
- [7] MCMILLIN B K, PALMER J L, HANSON R K. Temporally resolved, two-line fluorescence imaging of NO temperature in a transverse jet in a supersonic cross flow [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(36):7532-7545.
- [8] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL P H. Application of quantitative two-line OH planar laser-induced fluorescence for temporally resolved planar thermometry in reacting flows [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(18): 4000-4012.
- [9] 李云飞,司国良,郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(S1):158-163.
- LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(S1):158-163. (in Chinese)
- [10] 董汉磊,徐力平,高颖敏,等. 基于 Bior 小波变换和中值滤波的图像去噪[J]. *通信技术*, 2009, 42(11):171-175.
- DONG H L, XU L P, GAO Y M, *et al.*. Image-denoising based on bior wavelet transform and median filter [J]. *Communications Technology*, 2009, 42(11):171-175. (in Chinese)
- [11] 同武勤,凌永顺,黄超超,等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):138-144.
- TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH, *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):138-144. (in Chinese)
- [12] VINCENT L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 2(2):176-201.
- [13] 马继明,宋顾周,王群书,等. 辐射图像脉冲噪声去除方法[J]. *应用物理*, 2010, 1(2):211-216.
- MA J M, SONG G ZH, WANG Q SH, *et al.*. An impulse noise removing method for radiation image[J]. *Applied Physics*, 2010, 1(2):211-216. (in Chinese)
- [14] 胡延军,苗春卫,张笈. 含噪图像的处理方法与评价[J]. *宇航计测技术*, 2005, 25(1):59-63.
- HU Y J, MIAO CH W, ZHANG J. The processing methods and estimate of noised image [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2005, 25(1):59-63. (in Chinese)
- [15] BUDES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms with a new one [J]. *Multiscale Model Simul*, 2005, 4(2):490-530.

## 作者简介:



**王 晨**(1977—),男,山东乳山人,硕士,工程师,1999年于天津大学获得学士学位,2008年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: pplunum1@163.com



**李国华**(1985—)男,甘肃武威人,硕士,工程师,2010年于国防科学技术大学获得硕士学位,主要从事燃烧场光谱诊断方面的研究。E-mail: liguohua602@163.com



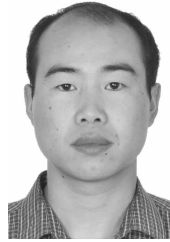
**张振荣**(1974—),男,陕西蒲城人,硕士,副研究员,1997年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nintzzr@163.com



**胡志云**(1969—),男,河南人,博士研究生,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1998年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthzy@163.com



**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: sj\_opt@163.com



**叶景峰**(1979—),男,河南西平人,硕士,副研究员,2001年、2004年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: leafey1979@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)