

强度分类变换在平面激光诱导荧光探测气溶胶流场中的应用

陈思颖, 郝伟, 陈和, 郭磐*, 徐清玥, 薛帆

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 利用平面激光诱导荧光(PLIF)技术实现气溶胶流场的实时探测,对气溶胶流场运动的研究有着重要意义。针对 PLIF 气溶胶流场实时探测中微弱信号可视性较差的问题,提出一种信号强度分类变换方法,根据信号强度特征设定限制条件,通过迭代将信号分为若干强度区间,并对各区间内信号强度重新规划赋值。将强度分类变换方法应用于 PLIF 气溶胶流场探测的荧光信号处理,与限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)的处理结果相比,该方法在大动态范围荧光信号的微弱信号增强、噪声抑制方面具有较好的效果,对微弱信号信背比的提升超过 20%。针对气溶胶流场不同变化阶段,所提方法可以实现 25 frame/s 的实时处理,满足对气溶胶流场荧光信号实时探测的要求。

关键词 激光诱导荧光; 气溶胶探测; 分类变换; 实时探测; 图像增强

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230979

Application of Piecewise Intensity Transformation in Aerosol Flow Field Detection Based on Planar Laser-Induced Fluorescence

Chen Siying, Hao Wei, Chen He, Guo Pan*, Xu Qingyue, Xue Fan

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Real-time detection of aerosol flow field using planar laser-induced fluorescence (PLIF) technology is crucial for studying the motion of aerosol. To enhance the visibility of weak signals in real-time PLIF aerosol signal detection, we propose a method of piecewise intensity transformation in this paper. This method sets constraints based on the characteristics of signal intensity, iteratively divides the signal into several intensity ranges, and then replans the signal intensity in each range. The proposed piecewise intensity transformation is applied to the signal processing of PLIF aerosol flow field detection, compared with the processing results of limited contrast adaptive histogram equalization (CLAHE), this method has good results in weak signal enhancement and noise suppression of large dynamic range fluorescent signals, with an improvement of over 20% in the signal-to-background ratio of weak signals. The proposed method achieves real-time detection at 25 frames per second for different stages of aerosol flow field, meeting the requirements for real-time detection of aerosol flow field fluorescence signal.

Key words laser-induced fluorescence aerosol detection; classification transformation; real-time detection; image enhancement

1 引言

气溶胶是悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统,是以固体或液体为分散质、气体为分散介质所形成的溶胶^[1-2]。由于气溶胶分散质来源的多样性、传播的广泛性,气溶胶流场对大气安全和

生物健康有着重大的影响^[3]。由于空气的流动性,气溶胶浓度分布是随时变化的,研究气溶胶流场的运动传播规律,实现有机气溶胶溯源追踪对于有效减轻空气污染和改善人类健康至关重要。平面激光诱导荧光技术(PLIF)以片激光作为辐射源,激发目标物质发出荧光,实现对目标的探测^[4]。由于灵敏度高、探测范围

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-21; 录用日期: 2023-06-01; 网络首发日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(42005137)

通信作者: *guopan@bit.edu.cn

大、非侵入式探测等优点,其已成为流场可视化分析的主要方法之一^[5-10]。Shan 等^[11]借助 PLIF 技术对湍流成像,实现对湍流特性的分析。Yu 等^[12]采用 PLIF 技术可视化了喷嘴流场中气氧混合区空间分布。

PLIF 流场探测研究对探测范围环境的要求较高,对环境噪声、设备电子噪声的容忍性较低。受硬件及探测环境的制约,基于 PLIF 技术流场探测系统获取的荧光信号中存在大量噪声,直接光电转化所得荧光信号图像的可视性较差,因此图像信号处理成为了 PLIF 流场探测的关键步骤。Chen 等^[13]利用背景减法使 PLIF 信号呈现出清晰的强度分布;Chang 等^[14]利用转换矩阵和空域滤波,对荧光信号进行时间和空间上的激发激光能量修正,排除激发片光能量分布不均对荧光强度的影响;王晟等^[15]采用形态学的方法处理单幅荧光图像中的噪声。作为流场中较为特殊的一种,气溶胶流场具有变化迅速、不同位置浓度悬殊、边界模糊等特性,其受激荧光信号强度动态范围大,低浓度气溶胶荧光信号极易淹没在高浓度气溶胶荧光信号或背景噪声中。传统 PLIF 信号处理研究聚焦于去噪及能量矫正等方面,很少关注对微弱信号的显示增强,且数据处理滞后于实验,研究人员对流场形态的掌握与实验在时间上不同步。图像信号处理常用的限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)方法限制了对比度,抑制噪声放大的同时,也减弱了对微弱信号的增强效果。

在实际研究中,在探测的同时对迅速变化气溶胶流场进行实时、连续、清晰的显示,缩短了实验探测到人员观察的时间跨度,有助于研究人员同步掌握流场实时情况,有利于对特殊目标信号进行针对性的捕捉。

针对气溶胶流场实时探测中微弱信号增强的需要,本文提出一种信号强度分类变换方法,根据信号的强度特征选定分类数量和分界点,将信号强度分为若干区间,设定限制条件对分界点和强度区间进行迭代,并重新规划各区间内信号的强度值,最终实现对目标信号的增强。将该方法应用于气溶胶流场 PLIF 信号探测实验中,并与 CLAHE 方法进行对比。通过计算处理前后信号的信背比,验证所提方法增强微弱信号的能力;统计信号强度分类变换方法的处理时间,验证其对信号的实时处理能力。

2 PLIF 气溶胶流场探测系统和信号预处理

2.1 系统介绍

PLIF 技术采用片状激光作为激发光源,激发探测面内气溶胶粒子产生荧光信号,并利用相机对荧光信号进行采集。相机上每个基本成像单元与目标探测区域内的有限元位置一一对应。本实验所用的气溶胶浓度分布平面探测系统如图 1 所示,分为气溶胶发生器、激光发射模块、信号采集模块、信号处理模块等 4 部分。

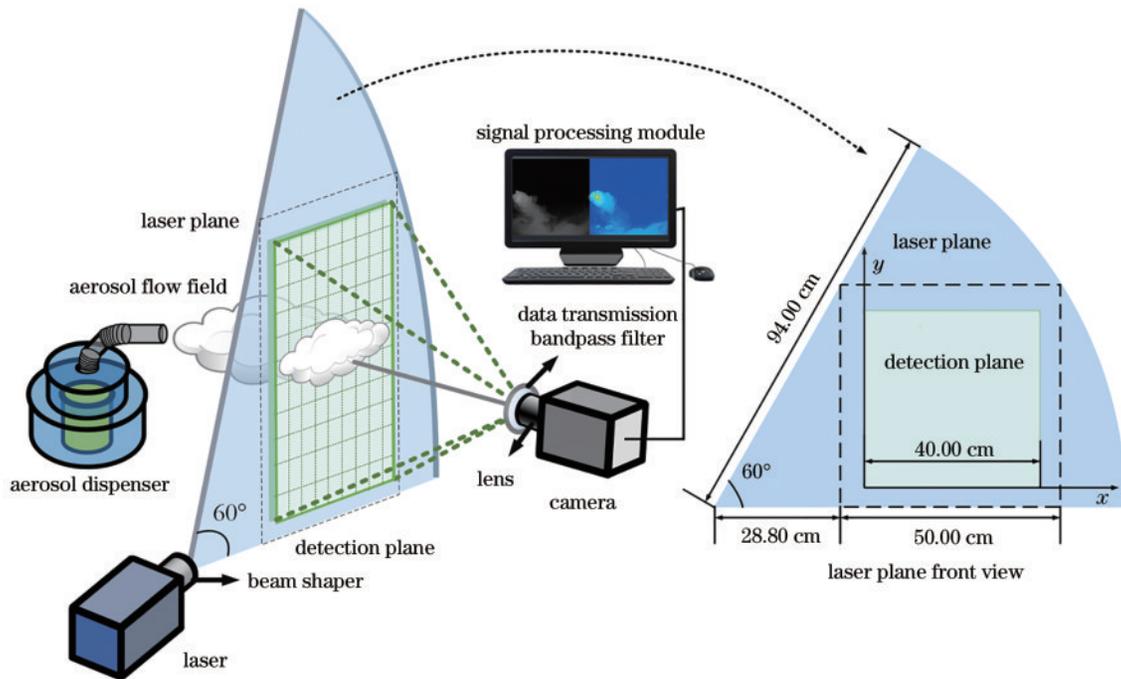


图 1 气溶胶浓度分布平面探测系统示意图

Fig. 1 Schematic of aerosol concentration distribution plane detection system

激光发射模块由激光器、光学整形元件组成。激光光源发射波长为 450 nm 的连续激光,激光出射口前配备的光学整形元件将激光整形为厚度为 2 mm、顶角 60°、边长 94 cm 的扇形激光片。气溶胶发生器

可以产生不同流速的气溶胶流场。信号采集模块由 CMOS 相机、光学镜头及带通滤光片组成,其探测方向与激光片垂直,探测范围为 40 cm × 40 cm,用于识别采集荧光素溶液所产生的荧光信号。信号处理模

块用于处理、显示、存储荧光信号。设备具体参数如 表 1 所示。

表 1 气溶胶浓度分布平面探测实验设备及其主要参数

Table 1 Specification chart of the aerosol concentration distribution plane detection system

Device name	Parameter	Value
Laser New Industries MDL-III -450	Laser wavelength /nm	450
	Laser power /mW	0-100
	Maximum resolution	2048×2048
Camera HAMAMATSU ORCA-Flash4.0 V3	Digital output /bit	16
	Dark current /($\text{electrons} \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.06
	Readout noise /($\text{electrons rms @100 fps}$)	1.6
Lens KOWA LM16XC	Lens focal length /mm	16
	Lens aperture number F	2.0-22
Filter Edmund #33-331	The filter bandpass wavelength /nm	500-600

2.2 信号预处理

利用 PLIF 设备直接采集获得的气溶胶流场的荧光信号整体偏暗,存在环境光噪声,扩散气溶胶流场和背景占据了信号图像中大部分像素,扩散气溶胶流场信号微弱,与背景不易区分,如图 2(a)所示。分析

原始信号直方图[图 2(d)]可知,97.6% 像素的强度值集中分布在[50, 200]的低强度区间,代表微弱信号与背景噪声,且两者之间无明显的强度差异。因此需要对信号进行预处理,以减少主要噪声对信号观察的影响。

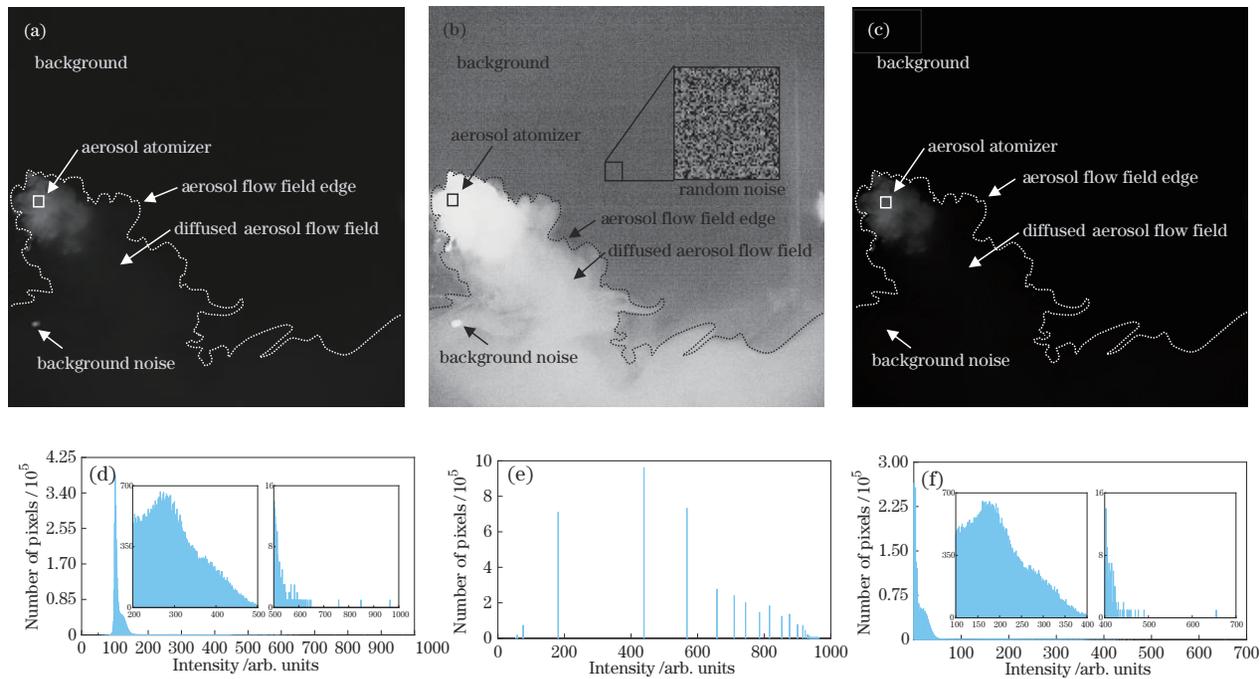


图 2 信号及对应直方图。(a)原始信号;(b)直方图均衡结果;(c)预处理结果;(d)原始信号直方图;(e)直方图均衡处理结果直方图;(f)预处理信号直方图

Fig. 2 Signal and histogram. (a) The original signal; (b) result of histogram equalization; (c) result of preprocessing; (d) histogram of the original signal; (e) histogram of Fig. 2(b); (f) histogram of Fig. 2(c)

在固定的实验条件下,由环境杂散光、图像传感器响应的非均匀性所引起的固定模式的背景噪声[图 2(a)中箭头标注]、由图像传感器和信号链路中的热噪声、散粒噪声等所组成的随机噪声为信号中存在的主要噪声^[16]。信号气溶胶发生器喷发口[图 2(a)中方框标注]附近的气溶胶浓度较高,荧光信号较强,可观察到明显的气溶胶团,而空间其他区域气溶胶团浓度

较低,荧光信号微弱,气溶胶流场边缘与背景难以直接观察区分,诸多细节被噪声掩盖,难以观察分辨。为了更好地展现气溶胶流场荧光信号及噪声的特点,对原始信号进行直方图均衡处理,如图 2(b)所示,从中可以看到明显的气溶胶流场边缘、背景噪声及随机噪声。

采用背景减除及中值滤波对原始信号进行预处理,其具体步骤如下:在人工喷发气溶胶之前,预先采

集 N 张背景信号 $f_i, i=1, 2, \dots, N$, 获取背景噪声的像素空间特征, 并在信号处理过程中予以消除。上述过程可表示为

$$f_a = f_0 - \frac{\sum_i^N f_i}{N}, \quad (1)$$

式中: f_a 为消除背景噪声之后的信号; f_0 为原始信号。背景减除可以抑制强度较高的背景噪声。

随机噪声呈现为强度变化较大的离散粒子状, 而气溶胶流场在空间上绵延, 其荧光信号在图像中为强度起伏较缓的连续面。针对随机噪声的特点, 采用处理单元为大小为 3×3 的中值滤波器对信号进行处理^[17]。

$$f(x, y) = \text{median}_{(s, t) \in S_{xy}} \{f_a(s, t)\}, \quad (2)$$

式中: f 为滤波后强度值; (x, y) 为位置坐标; S_{xy} 为中点在 (x, y) 处且大小为 3×3 的结构元; f_a 为结构元中每个点的强度。

预处理结果如图 2(c) 所示。与图 2(a) 原始信号相比, 图 2(c) 背景区域强度值更低, 表明预处理对信号背景区域中的噪声起到了抑制作用; 此外, 图 2(a) 原始信号左下方存在的点状背景噪声也在图 2(c) 中得到了有效的抑制; 由图 2(d) 和图 2(f) 可知, 预处理前后的信号直方图的分布形态相近, 仅在强度范围上存在一定差异, 说明预处理在抑制噪声的同时保留了信号的强度特征。

3 强度分类变换方法

为了增强低浓度气溶胶的微弱信号, 采用信号强度分类变换方法。该方法包含信号分类和强度规划赋值两个步骤。信号分类是指根据不同浓度气溶胶信号的强度特征, 将信号强度范围划分为若干区间; 强度规划赋值是指对各区间中信号强度值进行重新规划赋值。通过这两个步骤实现对微弱气溶胶荧光信号的增强以及对强信号细节的刻画。

3.1 信号分类

设二维荧光信号为 $f(x, y)$, 令 $h(r)$ 为强度值为 r 的像素的数量, 则函数 $h(r)$ 也可以表示 $f(x, y)$ 的强度直方图。 $f(x, y)$ 的平均强度可表示为

$$\bar{r} = \frac{\sum h(r)r}{\sum h(r)}. \quad (3)$$

若要将信号按强度值分为 n 类, 则需要包含 0 及信号强度最大值 r_{\max} 在内的 $n+1$ 个端点。以 0 和 r_{\max} 为边界, 在 \bar{r} 两侧等间距分段, 以分段的端点作初始强度端点, 即

$$R(i) = \begin{cases} \left[\frac{2\bar{r}}{n} i \right], & i = 0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \\ \left[\frac{2(r_{\max} - \bar{r})}{n} (i - \frac{n}{2}) + \bar{r} \right], & i = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。以 $R(i)$ 为端点, 将信号范围 $[0, r_{\max}]$ 分为 $[0, R(1)], [R(1)+1, R(2)], \dots, [R(n-1)+1, r_{\max}]$, n 个强度区间, 每个区间的强度均值为

$$\mu(i) = \frac{\sum_{r=R(i-1)+1}^{R(i)} h(r)r}{\sum_{r=R(i-1)+1}^{R(i)} h(r)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

强度端点 $R(i)$ 与相邻强度区间的 μ 的均值的差可表示为

$$\Delta R(i) = R(i) - \frac{\mu(i) + \mu(i+1)}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (6)$$

将新的强度端点定义为

$$R_N(i) = \begin{cases} R(i) + \frac{\Delta R(i)}{|\Delta R(i)|} \left[|\Delta R(i)| - \frac{1}{2} \right], & i = 1, 2, \dots, n-1. \\ R(i), & i = 0, n \end{cases} \quad (7)$$

将 $R_N(i)$ 按照升序排列, 并依次代入式 (5)、(6)、(7) 进行迭代计算。

当所有 $\Delta R(i)$ 符合限制条件:

$$|\Delta R(i)| < 1, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (8)$$

时, 则认为此时的 $R(i)$ 为最终强度端点, 将直方图 $h(r)$ 按强度值 r 分为 n 类, 即根据信号强度值之间的相关程度将信号分为 n 个强度阶梯。强度阶梯在像素空间中的排布反映了气溶胶流场在探测空间中的浓度层次分布。预处理之后, 剩余噪声强度值普遍小于信号强度值, 因此强度区间 $[R(i-1)+1, R(i)]$ 的强度均值 $\mu(i+1)$ 越小, 该强度区间内噪声成分越多。分类数 n 大小根据后续的信号规划赋值方法来确定。

3.2 强度规划赋值

信号分类可以将信号按照强度划分为强度区间。通过对不同区间内信号强度的重新规划赋值, 便可实现对特定强度区间内气溶胶信号的增强以及对噪声的抑制。在处理时确定分类数量的标准不同、赋值方式不同, 最终处理效果也会有所差异。通过分析气溶胶流场荧光信号的特点, 设计了两种不同强度规划赋值的方式, 并在实验部分进行对比分析。

3.2.1 分类次序赋值

以原始信号强度均值 \bar{r} 和标准差 σ 乘积的一半作为分类数量 n , 将每一类按强度均值 μ 的大小增序排列, 并将其排列次序作为本类中所有信号的最终强度值, 便可获得强度变换关系:

$$\begin{cases} k(i) = i - 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \sigma = \sqrt{\frac{\sum h(r)(r - \bar{r})^2}{\sum h(r)}} \\ n = \frac{\bar{r}\sigma}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中： k 为每一类的最终强度值； i 为排列次序； n 为分类数量。分类次序赋值以 μ 升序排列的次序值作为一个强度区间的最终赋值，相邻区间最终强度值之间差值为1，压缩了信号最小强度值到最大强度值之间的强度跨度，缩小了强弱信号之间的强度差距。强度区间 $[R(i-1)+1, R(i)]$ 的强度均值 $\mu(i)$ 越小，该强度区间内噪声占比越高，排列序号 i 越小，其最终赋值 $i-1$ 也越小。

3.2.2 分类次序平方赋值

以原始信号最高强度值的平方根作为分类数量 n ，将每一类强度均值的大小按照增序排列，将排列次序的平方作为本类中所有信号的最终强度值，便可获得强度变换关系：

$$\begin{cases} k(i)=(i-1)^2, i=1,2,\dots,n \\ n=\sqrt{r_{\max}} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知，经分类次序平方赋值处理的信号保留了原始信号最小强度值到最大强度值之间的强度跨度，以强度均值 μ 升序排列次序 i 的平方作为对应强度区间的最终赋值，缩小了弱强信号之间的强度差距，并对噪声占比最高的强度区间 $[0, R(1)]$ 的抑制较强。分类次序平方赋值分类数量 n 较小，分类所得各强度区间 $[R(i-1)+1, R(i)]$ 较宽，会导致处理所得信号变化不连续，呈现出阶梯状。噪声和微弱信号的强度相近，在均值 μ 较小的强度区间内噪声与部分微弱信号共存，在赋值阶段抑制噪声的同时，也消减了部分微弱信号。

3.3 信号处理流程

所提信号处理方法通过预处理、信号分类、强度规划赋值等3个步骤得到强度变换关系，将经过规划之后的强度变换关系应用到原始信号 $f(x, y)$ 中，便可以得到处理之后的信号 $g(x, y)$ 。信号处理过程的流程图如图3所示。

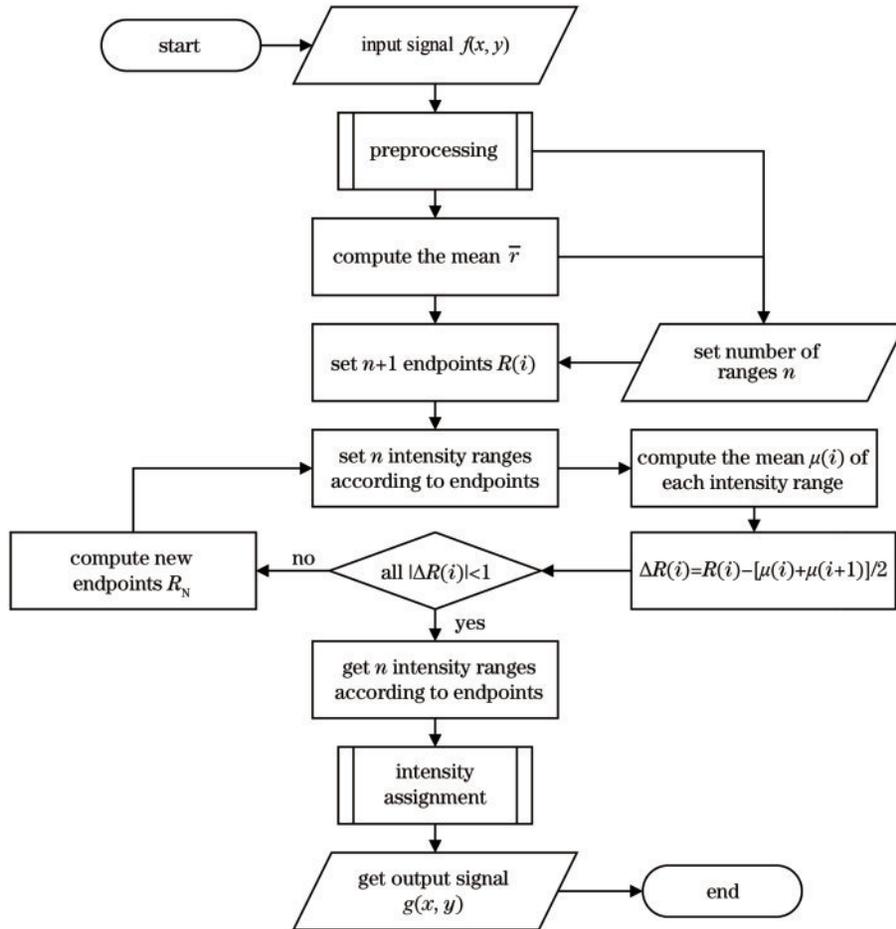


图3 信号处理流程图

Fig. 3 Flow chart of signal processing

4 实验和分析

4.1 实验

配置质量浓度为0.1 g/L的荧光素(C₂₀H₁₀O₅N₂)溶液，并用气溶胶发生器以3 mL/min的速率进行喷雾雾化，使其在探测腔室中形成以荧光素液滴为分散

质，空气为分散介质的气溶胶流场。调整激光功率为100 mW，照射激发气溶胶的荧光。设置相机曝光时间为25 ms，镜头光圈 $F=2.0$ 。信号采集模块采集方向与激光面垂直，距离激光面40 cm，探测40 cm×40 cm范围内气溶胶流场的喷发及沉降过程，记录其荧光信号。单次探测持续130 s，其中，0~52 s为气溶

胶喷发过程,第 52 s 关闭气溶胶发生器,53~130 s 为气溶胶沉降过程。所得到的 PLIF 信号如图 4 所示,图 4(a)~(e) 为气溶胶流场的喷发过程,图 4(f)~(j)

为喷发结束后气溶胶沉降过程。为了更加清晰地展现实验结果及处理效果,本小节图片均经过相同的伪彩色处理。

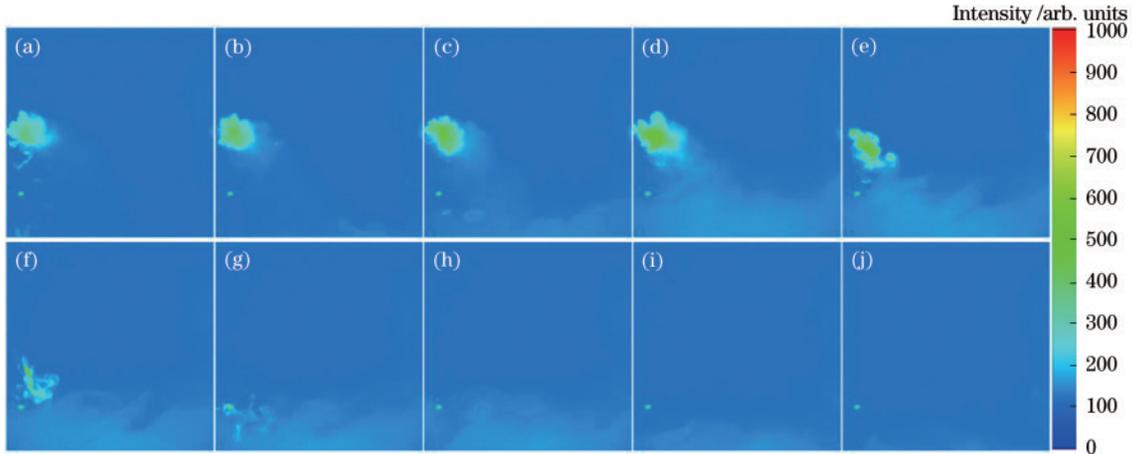


图 4 气溶胶流场原始信号。(a)~(e)喷发 1 s、15 s、30 s、50 s、52 s; (f)~(j)沉降 1 s、2 s、6 s、48 s、60 s

Fig. 4 The original signal of aerosol flow field. (a)~(e) Exhalation for 1 s, 15 s, 30 s, 50 s, 52 s; (f)~(j) sedimentation for 1 s, 2 s, 6 s, 48 s, 60 s

4.2 处理结果

使用信号强度分类变换方法处理实验数据,在完成信号预处理及分类之后,采用第 3.2 节中提到的两种强度规划赋值方式对信号进行赋值,并与预处理信号进行对比。图 5 为喷发 26 s 后气溶胶流场信号的处理结果。图 5(a) 为预处理之后的信号,在预处理、信号分类的基础上,使用分类次序赋值、分类次序平方赋值两种方法进行处理,分别得到图 5(b)、(c),其分类数 n 及强度对应关系由式(9)、(10)确定。作为对照,图 5(d) 给出了 CLAHE 方法的处理结果,利用 Matlab 中 `adapthisteq` 函数实现^[18],其处理参数在手动调优后,设置如下:图块分割数量为 100,对比度增强限制为 0.0005,直方图柱数为 65536。

从图 5(a) 可以看到,经过预处理的信号背景相对干净,左侧气溶胶发生器喷发口附近高浓度气溶胶信号较为明显,而探测空间右下角的低浓度气溶胶团荧光信号微弱,形态细节不明显,变化趋势难以分辨。

图 5(b) 背景较为干净,左侧中部高浓度气溶胶团的层次丰富,中下部气溶胶扩散趋势明显,右下低浓度气溶胶微弱荧光信号与背景区明确,气旋细节清晰。分类次序赋值处理的强度变换关系如图 6(a) 所示,处理过程压缩了原始信号的强度跨度,因此该方法处理后信号的强弱信号对比度与原始信号的强弱信号对比度差别较大。图 5(c) 背景中噪声强度较弱,右侧残存部分条状环境光噪声,分类次序平方赋值方法对噪声的抑制效果最好,在保证强信号层次的同时,对微弱信号也有相应的增强。分类次序平方赋值处理的强度变换关系如图 6(b) 所示,由于分类数量较少,映射曲线程阶梯状,在处理结果中表现为强信号区域信号变化不连续,出现较为明显的伪轮廓。图 5(d) 背景中噪声呈离散点状且数量较多,噪声强度与弱信号相当,信号与背景的边界较为模糊,说明 CLAHE 方法在增强了微弱信号的同时也增强了背景噪声,不利于信号细节的表现。

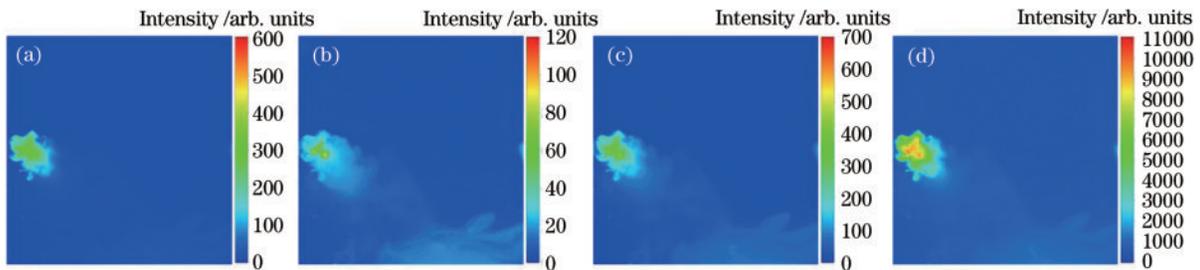


图 5 气溶胶流场信号处理结果。(a)预处理信号;(b)分类次序赋值;(c)分类次序平方赋值;(d) CLAHE

Fig. 5 Processing results of aerosol flow field signal. (a) Preprocessed signal; (b) order assignment; (c) order squared assignment; (d) CLAHE

所提信号强度分类变换方法在保证强信号细节变化的同时,显著提升了微弱信号与背景对比度,使其细

节清晰,易于观察。其中,分类次序赋值方法分类数较多,对弱信号的增强较为明显,且强信号区域到微弱信

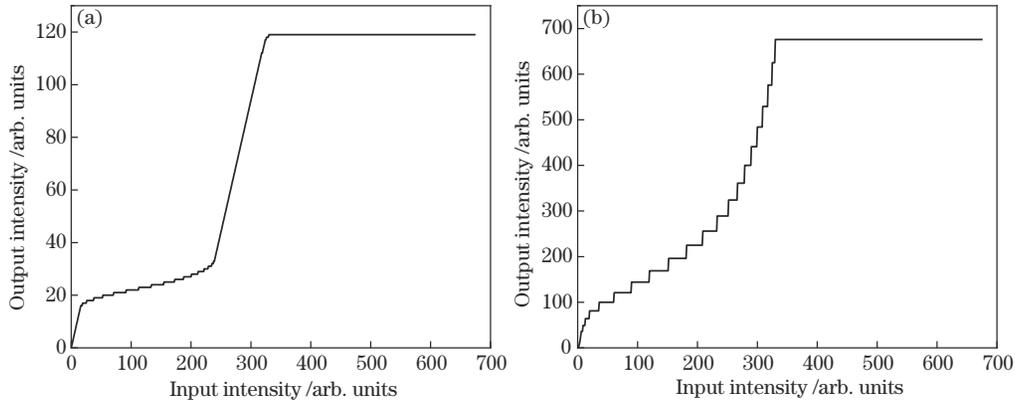


图 6 强度变换关系。(a)分类次序赋值;(b)分类次序平方赋值

Fig. 6 Intensity transformation. (a) Order assignment; (b) order squared assignment

号区域的过渡流畅,符合气溶胶流场的动态变化性质,适用于强弱信号对比度差异较大信号的处理。分类次序平方赋值方法对噪声的抑制效果最好,但会损伤部分微弱信号,且处理结果有较明显的伪轮廓,适用于噪声较多,信噪区分度较好的信号。以保留背景噪声,

仅去除随机噪声的信号为例,说明其效果。图 7(a)为保留背景噪声的喷发初期气溶胶荧光信号,未扩散气溶胶的信号较强,与噪声区分度较高,符合分类次序赋值的适用情况。图 7(b)为分类次序赋值处理结果,信号细节清晰,背景干净。

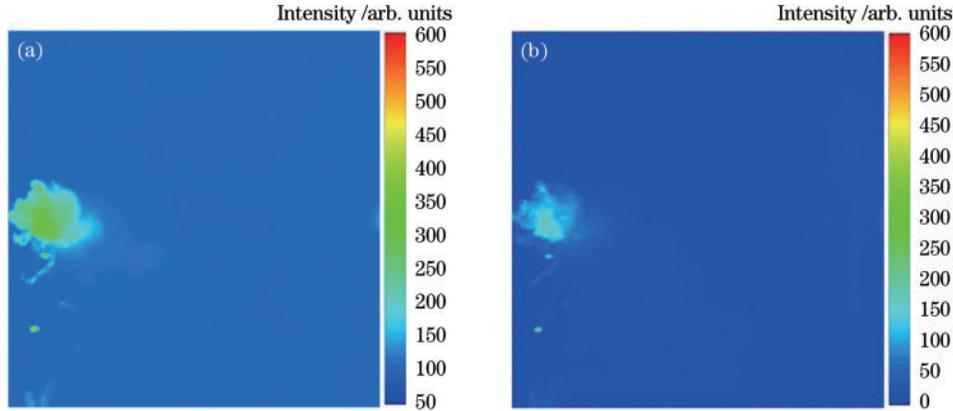


图 7 分类次序赋值处理适用情况。(a)保留背景噪声的信号;(b)对图 7(a)进行分类次序赋值处理的结果

Fig. 7 Application of order squared assignment. (a) Signal with background noise; (b) result of order squared assignment applied on the signal in Fig. 7 (a)

图 8 为气溶胶流场喷发到沉降过程中不同阶段的荧光信号。信号均采用分类次序赋值方法进行处理。图 8(a)~(e)为气溶胶流场的喷发过程,图 8(f)~(j)为喷发结束后气溶胶沉降的过程。相比于图 4 中未处理的原始信号,图 7 所示的强度分类变换方法的处理结果,对气溶胶流场在探测范围内的变化细节、流动趋势的展现更加充分。

4.3 结果分析

图 9 为气溶胶流场喷发及沉降过程中某一时刻原始信号与处理之后信号的直观对比,采用预处理之后分类次序赋值的处理方法。在初始喷发阶段,相比于原始信号,处理信号对探测区域中部低浓度气溶胶及左下部分气溶胶流场流动扩散细节的展现更加清晰,如图 9(a)、(e)所示。在流动积累阶段,相比于原始信号,处理信号中低浓度气溶胶团的信号得到增强的同时,增强了高浓度气溶胶团内部变化层次,如图 9(b)、

(f)所示。在沉降阶段,相比于原始信号,处理后信号中的噪声得到了充分抑制,气溶胶团与背景的分更分明,如图 9(c)、(g)和图 9(d)、(h)所示。经信号强度分类变换法处理之后的信号细节清晰,背景干净,有利于对气溶胶流场变化情况的观察。

信背比为信号区域平均强度值与背景区域平均强度值的比值,是评估目标信号显著程度的量化指标,能直观地表示出目标信号与背景的分明情况^[19],其计算方式为

$$R_{sb} = 10 \left| \lg \frac{f_s}{f_b} \right|, \quad (11)$$

式中: f_s 为信号区域平均强度值; f_b 为背景平均强度值。以图 5 为例,分别计算原始信号及不同处理方法所得结果的信背比,不同强度信号的信背比,并与 CLAHE 方法处理的图像进行对比。由于预处理后信号低浓度气溶胶目标与背景强度值相近,无法选择准确的阈值

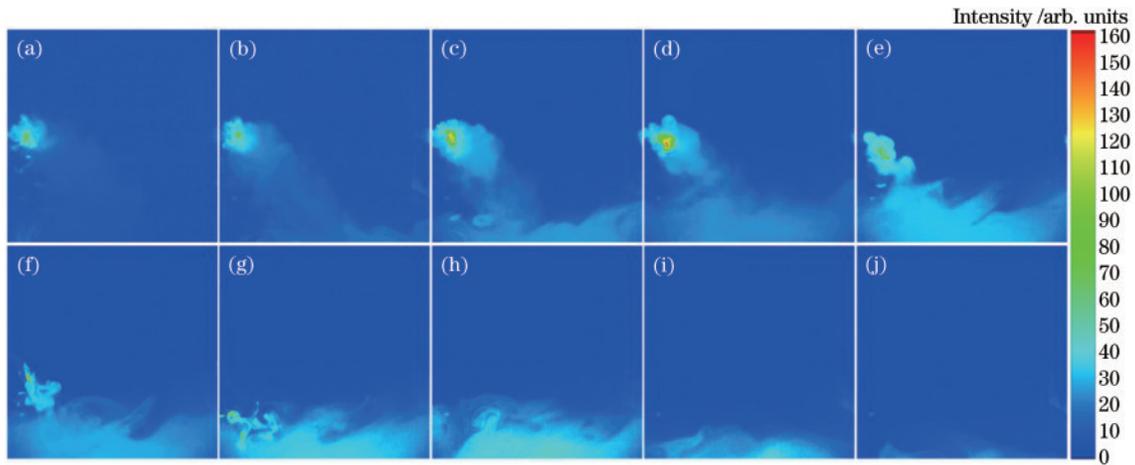


图 8 对图 4 信号分类次序赋值处理结果。(a)~(e) 喷发 1 s、15 s、30 s、50 s、52 s；(f)~(j) 沉降 1 s、2 s、6 s、48 s、60 s
 Fig. 8 Results of order assignment applied on the signal in Fig. 4. (a)~(e) Exhalation for 1 s, 15 s, 30 s, 50 s, 52 s; (f)~(j) sedimentation for 1 s, 2 s, 6 s, 48 s, 60 s

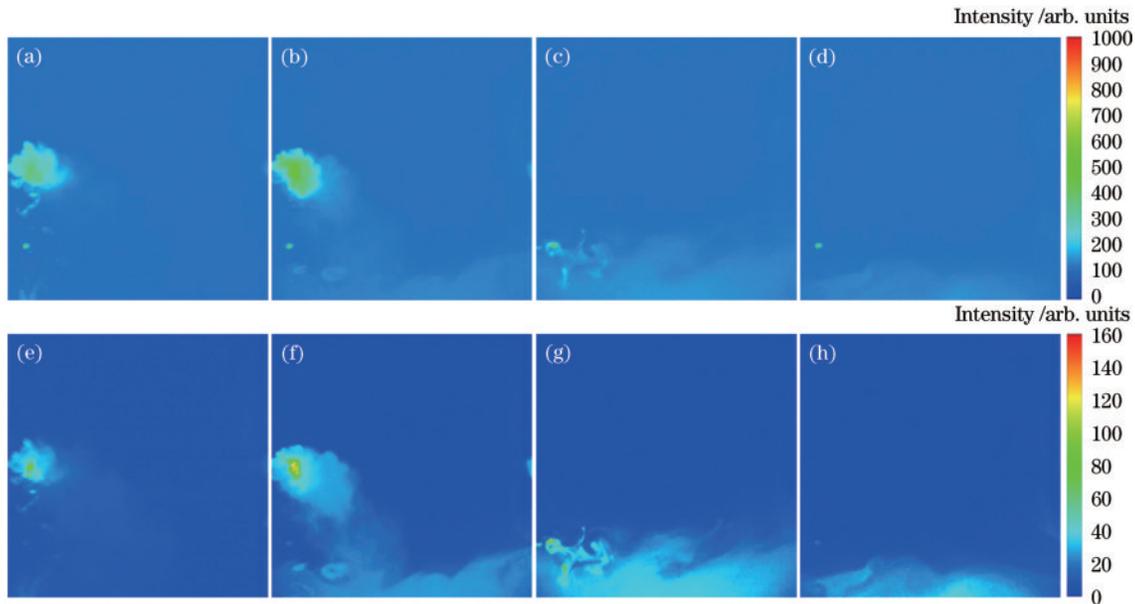


图 9 原始信号与处理结果对比。(a)~(d) 原始信号；(e)~(h) 处理结果
 Fig. 9 Comparison of original signals and processed signals. (a)~(d) Original signals ; (e)~(h) processed signals

进行分割,因此强弱信号目标区域由人工选取产生。选取结果如图 10(a)所示,其中,短划线边框标注为背景区域,实线边框标注区域为强信号区域,点虚线边框标注区域为弱信号区域。强信号区域和弱信号区域共同组成信号区域。

从图 10(b)可以看出:经信号分类次序赋值处理后,信号信背比由 12.8 增加至 13.2,提升 3.1%,其中:强信号信背比由 18.8 减少至 16.0,下降 14.8%;弱信号信背比由 8.6 增加至 12.2,提升 41.9%。强信号信背比下降是因为分类次序赋值处理压缩了信号最小强度与最大强度之间的跨度,缩小了强弱信号强度差距的同时也导致强信号与噪声对比度的下降。经分类次序平方赋值处理后,信号信背比由 12.8 增加至 16.8,提升 31.3%,其中:强信号信背比由 18.8 增加至 20.7,

提升 10.1%;弱信号信背比由 8.6 增加至 15.3,提升 77.9%。CLAHE 方法提升微弱信号强度的同时,也提升了噪声,经其处理的信号信背比有所下降。

以弱信号区域为目标,计算气溶胶喷发不同阶段预处理信号经不同处理方法所得结果的信背比,如图 11 所示。在喷发 1 s 的初始阶段,分类次序赋值处理和分类次序平方赋值处理将弱信号信背比由 3.9 提高至 6.8、4.7,分别提升 74.3%、20.5%;在喷发 26 s 的流动阶段,这两种方法将弱信号信背比由 8.6 提高至 12.2、15.3,分别提升 41.8%、77.9%;在喷发 47 s 的喷发积累阶段,这两种方法将弱信号信背比由 10.9 提高至 13.9、16.7,分别提升 27.5%、53.2%;在喷发 54 s 的初始沉降阶段,这两种方法将弱信号信背比由 10.4 提高至 14.2、14.3,分别提升 36.5% 和 37.5%。

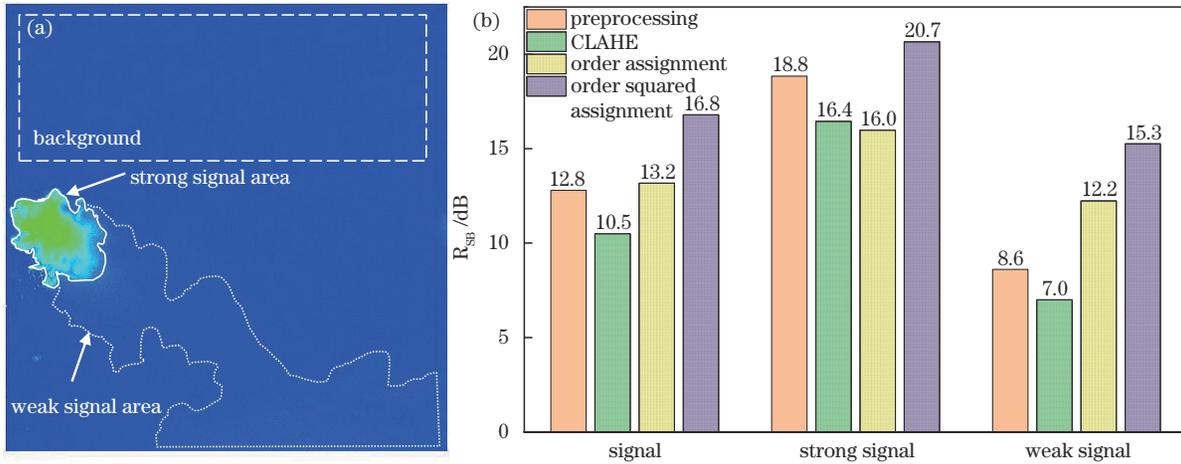


图 10 信号区域及信背比。(a)信号区域示意图;(b)不同方法处理结果信背比

Fig. 10 Signal area and R_{SB} . (a) Schematic of signal areas; (b) R_{SB} of signal with different processing

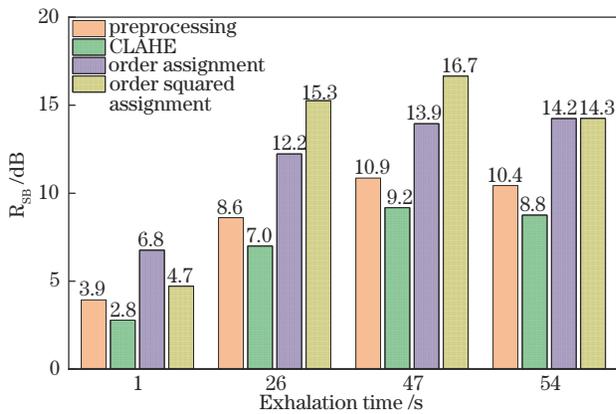


图 11 各喷发阶段气溶胶信号经不同方法处理结果的弱信号信背比

Fig. 11 The R_{SB} of weak signals with different exhalation time processed by different processing

综上所述,对于不同喷发阶段,不同气溶胶形态的信号,强度分类变换方法能有效提高信号的信背比,对微弱信号信背比的提升尤为显著。

所提强度分类变换方法对喷发不同阶段信号的处理耗时如表 2 所示,耗时包含预处理、信号分类、强度规划赋值所用时间。在 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 硬件平台中,针对不同气溶胶喷发阶段,强度分类变换方法处理耗时基本稳定在 35 ms。在实际探测实验中,针对分辨率为 2048×2048 的气溶胶流

表 2 强度分类变换方法处理耗时

Table 2 Elapsed time of piecewise intensity transformation

Exhalation time /s	Elapsed time /ms	
	Order assignment	Order squared assignment
1	31.19	33.59
26	33.37	35.16
47	32.11	36.51
54	31.17	35.63

信号,可以实现 25 frame/s 的实时探测。

5 结 论

所提信号强度分类变换方法根据信号的强度特征设定分类数目和限制条件,通过迭代将信号分为若干强度区间,并重新规划各区间中信号的强度值,实现对 PLIF 探测气溶胶流场实验中微弱信号的增强。用 450 nm 激光激发荧光素溶液喷雾的荧光信号,引入信号强度分类变换方法对气溶胶流场荧光信号进行处理,分析不同强度规划赋值方法的特点。将两种强度规划赋值规则不同的信号强度分类变换方法,与 CLAHE 方法的处理结果进行比较,结果表明,信号强度分类变换方法对微弱信号有较好的增强效果,对背景噪声有一定的抑制作用,能有效提升微弱荧光信号与背景的对对比度,改善信号图像的可读性,对信号信背比的提升优于 CLAHE 方法。针对气溶胶流场不同变化阶段,信号强度分类变换方法可以实现 25 frame/s 的实时处理,能够实现对气溶胶流场荧光信号的实时探测,有助于研究人员及时掌握清晰的气溶胶流场的变化情况,对流场运动性质的研究有着重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 《环境科学大辞典》编辑委员会. 环境科学大辞典[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991: 496-497. Editorial Committee of the Dictionary of Environmental Sciences. Dictionary of environmental sciences[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991: 496-497.
- [2] 王翔朴, 王营通, 李珏声. 卫生学大辞典[M]. 青岛: 青岛出版社, 2000: 554-555. Wang X P, Wang Y T, Li J S. Great dictionary of hygiene[M]. Qingdao: Qingdao Publishing House, 2000: 554-555.
- [3] Landrigan P J, Fuller R, Acosta N J R, et al. The Lancet Commission on pollution and health[J]. Lancet, 2018, 391(10119): 462-512.

- [4] Lakowicz J R. Principles of fluorescence spectroscopy [M]. 3rd ed. New York: Springer, 2006: 362.
- [5] Pan Y L, Holler S, Chang R K, et al. Single-shot fluorescence spectra of individual micrometer-sized bioaerosols illuminated by a 351- or a 266-nm ultraviolet laser[J]. Optics Letters, 1999, 24(2): 116-118.
- [6] Pan Y L, Hartings J, Pinnick R G, et al. Single-particle fluorescence spectrometer for ambient aerosols[J]. Aerosol Science and Technology, 2003, 37(8): 628-639.
- [7] Jonsson P, Wästerby P, Gradmark P Å, et al. Bioaerosol detection and classification using dual excitation wavelength laser-induced fluorescence[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9455: 945509.
- [8] 朱鑫琦, 张佩, 王光辉, 等. 基于归一化本征荧光信号的气溶胶分类技术研究[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1310005.
Zhu X P, Zhang P, Wang G H, et al. Study of aerosol classification technique based on normalized intrinsic fluorescence signal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 50(13): 1310005.
- [9] 金川, 蒋利桥, 李凡, 等. 正丁烷/空气射流火焰热释放率与火焰面厚度的平面激光诱导荧光测试[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1304001.
Jin C, Jiang L Q, Li F, et al. Plane laser-induced fluorescence measurement of flame heat release rate and flame surface thickness of n-butane/air jet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1304001.
- [10] 朱家健, 万明盟, 吴戈, 等. 激光诱导荧光技术燃烧诊断的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401005.
Zhu J J, Wan M G, Wu G, et al. Research progress of laser-induced fluorescence technology in combustion diagnostics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401005.
- [11] Shan J W J. Mixing and isosurface geometry in turbulent transverse jets[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2001.
- [12] Yu X, Chang G A, Peng J B, et al. Oxygen concentration distribution measurement of the nozzle flow field by toluene/acetone planar laser-induced fluorescence [J]. Frontiers in Physics, 2019, 7: 205.
- [13] Chen S Y, Chen Y Y, Zhang Y C, et al. The 3D modeling system for bioaerosol distribution based on planar laser-induced fluorescence[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2607.
- [14] Chang G A, Yu X, Peng J B, et al. Absorption, quenching, and enhancement by tracer in acetone/toluene laser-induced fluorescence[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(12): 124212.
- [15] 王晟, 张振荣, 邵珺, 等. 瞬态流场定量测量中平面激光诱导荧光图像的降噪[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1858-1864.
Wang S, Zhang Z R, Shao J, et al. Denoising of PLIF images for flow parameter measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1858-1864.
- [16] Konnik M, Welsh J. High-level numerical simulations of noise in CCD and CMOS photosensors: review and tutorial[EB/OL]. (2014-12-11) [2023-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1412.4031>.
- [17] González R, Woods R. Digital image processing[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, PAMI-3: 242-243.
- [18] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Heckbert P S. Graphics gems. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [19] 张刘, 张皓晨, 刘付成, 等. 基于高信背比的视频低速暗弱目标增强[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 945-952.
Zhang L, Zhang H C, Liu F C, et al. Video enhancement method for low-speed dim targets based on high signal-to-background ratio[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 945-952.