

DOI:10.11784/tdxbz202412013

## 预混火焰图像的自适应分割与分区闪烁特性

王 超, 高龙雨, 曹晓宁, 肖名栋, 金 硕  
(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 预混火焰分区闪烁特性研究对于掌握火焰的燃烧机制, 理解火焰各分区的燃烧差异性具有重要意义。本文针对传统方法在火焰边缘检测和分区划分中存在的不足, 提出了一种预混火焰图像自适应分割的方法。根据预混火焰的反应面区域边缘特征, 自适应地选取不同方向的形态结构元素, 完成了反应面区的边缘提取。基于反应面区上、下边缘的空隙特征, 采用逐列搜索确定反应物区和预热区的上边缘。通过闭合反应物区和预热区上边缘, 实现了其边缘的完整提取。采用种子点填充算法, 将反应面区及反应物和预热区的边缘转换为相应的分区区域。采用 Otsu 方法分割图像中的火焰整体区域。通过逻辑操作确定产物区, 最终实现了预混火焰 3 个分区的划分。研究了不同流量和当量比下, 本生预混火焰不同分区的闪烁特性。研究表明, 预混火焰不同区域因其物理和化学特性的差异而呈现出不同的波动特性。预混火焰的低频部分主要来源于反应面区、反应物和预热区的闪烁波动, 频率成分较多; 产物区的闪烁波动呈现单一频率, 是闪烁频率主要来源。预混火焰产物区闪烁频率与总流量成正比关系, 在相同总流量条件下, 贫燃状态, 闪烁频率随着当量比的增加而增加; 富燃状态, 闪烁频率随着当量比的增加而降低; 当量比为 1.0 时, 闪烁频率最大。

**关键词:** 预混火焰; 闪烁频率; 图像法; 边缘检测; 形态学; 阈值法

中图分类号: TP271.4

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)11-1124-08

## Adaptive Segmentation and Zoned Flicker Characterization of Premixed Flame Images

Wang Chao, Gao Longyu, Cao Xiaoning, Xiao Mingdong, Jin Shuo  
(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The study of the flickering behavior in premixed flame zones is crucial for understanding the combustion mechanism and the differences in the chemical reactions among the distinct flame zones. To overcome the limitations of traditional edge detection and zone division methods, an adaptive segmentation method for premixed flame images is proposed. The proposed approach uses the edge characteristics of the reaction zone by adaptively selecting morphological structuring elements in different directions to precisely extract the reaction zone edges. Based on the gap features between the upper and lower edges of the reaction zone, a column-by-column search is performed to determine the upper edges of the reactant and preheat zones. After closing the edges of the reactant and preheat zones, the edges are fully extracted. The seed point filling algorithm converts these extracted edges into corresponding zonal regions. The Otsu method is used to segment the overall flame region in the image. Logical operations are then used to determine the product zone, thereby completing the precise division of the three zones in the premixed flame. The flickering characteristics of different zones of a Bunsen premixed flame are studied under various flow and equivalence ratios. The results show distinct fluctuation patterns in each zone owing to the varying physical and chemical properties. Low-frequency components mainly originate from the flickering and fluctuations in the reaction, reactant, and pre-

收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-01-13.

作者简介: 王 超 (1973—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 王 超, wangchao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62271343); 天津市研究生科研创新资助项目 (2022BKY080).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62271343), the Tianjin Research Innovation Project for Postgraduate Students (No. 2022BKY080).

heat zones, which exhibit multiple frequencies. In contrast, the product zone exhibits a single dominant frequency, serving as the primary source of flickering. Results further indicate that the flickering frequency of the product zone is proportional to the total flow. When the total flow of fuel and air is constant, the flickering frequency increases with the equivalence ratio under lean combustion conditions. In rich combustion states, the flickering frequency reaches its maximum at an equivalence ratio of 1.0.

**Keywords:** premixed flame; flickering frequency; image method; edge detection; morphology; threshold method

火焰闪烁频率是评估火焰稳定性的重要指标<sup>[1-2]</sup>, 与燃烧效率和污染物排放密切相关<sup>[3]</sup>. 图像法常被用于分析火焰的闪烁特性<sup>[4]</sup>.

根据燃料和氧化剂在燃烧前是否提前混合, 火焰分为预混火焰和扩散火焰. 图像法测量扩散火焰闪烁一般通过火焰的面积<sup>[5]</sup>、宽度<sup>[5]</sup>、高度<sup>[6]</sup>和灰度<sup>[7-8]</sup>, 从火焰整体图像对闪烁频率进行估计. 针对预混火焰, 大多数研究者采用火焰整体测量的方法<sup>[9-10]</sup>. 但 Lu 等<sup>[11]</sup>在分析预混火焰根部区域与中间区域的图像时, 发现两个区域的闪烁频率存在差异. 预混火焰具有明显的分区, 一般分为反应物区、预热区、反应面区和产物区<sup>[12]</sup>. 不同分区的燃烧特性存在显著差异, 因此, 有必要结合预混火焰分区对闪烁频率变化规律进行研究.

测量预混火焰不同分区闪烁特性的关键在于预混火焰内部区域的边缘检测和自动分割. 传统的图像边缘检测方法有 Prewitt 算子、Sobel 算子、Roberts 算子、Log 算子和 Canny 算子等<sup>[13]</sup>. 这类方法将一阶导数极大值点以及二阶导数过零点视作候选边缘点, 依靠选取适宜的阈值来完成从图像中提取边缘的任务. 但由于微分运算对噪声较为敏感, 在采用传统图像边缘检测方法时, 常常难以区分检测出的噪声点和边缘点, 进而造成火焰边缘呈现不连续的状态, 有时还会和实际火焰的形状不相吻合. 基于形态学边缘检测方法在图像边缘连续性方面优于基于边缘检测算子的方法<sup>[14]</sup>. 但该方法常常依赖于单一结构元素(如圆形、方形、十字形等)进行处理. 因此, 其仅仅能够检出与该结构元素同向的边缘, 而针对复杂边缘的情形, 难以做到根据实际状况自适应地对结构元素加以选择, 在一定程度上影响了该方法对于复杂边缘检测的有效性.

本文以经典本生预混火焰为研究对象<sup>[15]</sup>, 提出一种基于形态学的火焰反应面区边缘的提取方法. 根据像素点的平均梯度方向, 面对不同的边缘, 自适应地构成不同方向的形态结构元素. 以此为基础, 实现了反应物和预热区、产物区的划分, 分析不同流量和当量比下, 本生预混火焰不同分区的闪烁

特性.

## 1 火焰图像采集系统

火焰图像采集系统如图 1 所示. 该系统自左向右依次由空气压缩机、甲烷燃料、吸光布、本生火焰系统以及高速摄像系统构成. 本生灯直径为 12 mm, 通过 Alicat MC 质量流量控制器调整甲烷燃料和空气的流量, 形成不同当量比的燃烧火焰. 高速摄像系统, 配备 FASTCAM Min UX100 型高速摄像机和 SIGMA 50 mm F/1.4 镜头, 连接至采集电脑, 以 1 000 帧/s 的采样频率捕获 1 280 像素 × 616 像素的火焰图像, 每种工况共采集 5 s.

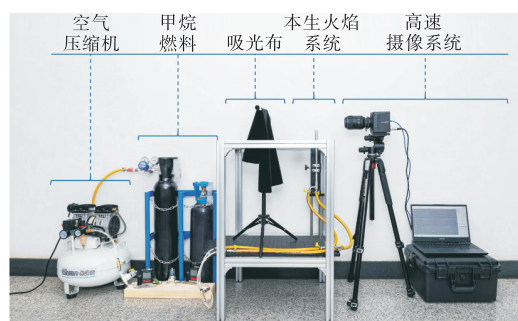


图 1 火焰图像采集系统

Fig.1 Flame image acquisition system

拍摄的本生预混火焰如图 2 所示. 其中, 发光的



图 2 预混火焰分区示意

Fig.2 Schematic of premixed flame zones

明亮锥面为反应面区,反应面区以外为产物区,反应面区包围的内部依次为预热区与反应物区.由于预热区极为狭窄且与反应物区的分界线不明显,因此,将反应物区和预热区一起标记.

## 2 基于自适应形态结构元素的火焰反应面区边缘提取

反应面区边缘的准确提取是火焰区域分割的关键.针对单一结构元素只能检出与结构元素同方向的边缘问题,提出了一种基于自适应形态结构元素的火焰反应面区边缘提取方法.

### 2.1 平均梯度向量

图像的边缘由原始图像二维函数  $f(x,y)$  的梯度向量表示为

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

复数形式为

$$G = G_x + iG_y \quad (2)$$

在局部邻域内,通过计算区域内所有点的梯度值并取其平均,得到中心点的平均梯度.然而,对梯度向量直接进行平均会导致方向相反的梯度向量彼此抵消.为了解决这一问题,定义平方梯度向量为

$$G^2 = (G_x + iG_y)^2 = G_x^2 - G_y^2 + 2iG_xG_y \quad (3)$$

对于  $n \times n$  邻域,其平均平方梯度为

$$\overline{G^2} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=-(n//2)}^{n//2} \sum_{l=-(n//2)}^{n//2} (G_{x,k,l}^2 - G_{y,k,l}^2 + 2iG_{x,k,l}G_{y,k,l}) \quad (4)$$

平均平方梯度的模值和相角分别为

$$|\overline{G^2}| = \left\{ \left( \frac{1}{n^2} \sum_{k=-(n//2)}^{n//2} \sum_{l=-(n//2)}^{n//2} (G_{x,k,l}^2 - G_{y,k,l}^2) \right)^2 + \left( \frac{1}{n^2} \sum_{k=-(n//2)}^{n//2} \sum_{l=-(n//2)}^{n//2} (2G_{x,k,l}G_{y,k,l}) \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\theta_{G^2} = \arg \left( \sum_{k=-(n//2)}^{n//2} \sum_{l=-(n//2)}^{n//2} (G_{x,k,l}^2 - G_{y,k,l}^2 + 2iG_{x,k,l}G_{y,k,l}) \right) \quad (6)$$

定义平均梯度向量的模值和相角分别为

$$\overline{G} = \sqrt{|\overline{G^2}|} \quad (7)$$

$$\theta_{\overline{G}} = \frac{1}{2} \arg \left( \sum_{k=-(n//2)}^{n//2} \sum_{l=-(n//2)}^{n//2} (G_{x,k,l}^2 - G_{y,k,l}^2 + 2iG_{x,k,l}G_{y,k,l}) \right) \quad (8)$$

平均梯度  $\overline{G}$  增强了边缘特征,提高了边缘检测的可靠性,减少了方向抵消的影响,使其在噪声和细微变化下更具鲁棒性.同时,恢复相位角后,平均梯度保持了边缘的方向信息,提升了细节敏感度.

### 2.2 自适应形态结构元素

反应面区的边缘曲线方向不断变化.当结构元素的方向与其垂直时,能够获得更好的边缘提取效果<sup>[6]</sup>.直线形结构元素具有多方向选择性,一般可根据边缘方向特点选择某一方向.对于  $3 \times 3$  矩阵的直线形结构元素,包括水平、垂直和正、负斜对角 4 种方向.边缘提取时,依据梯度方向的相角值自适应地选择与之最接近的直线形结构元素方向.当相角范围为  $(-\pi/8, \pi/8]$  时,选择水平方向;当相角范围为  $(\pi/8, 3\pi/8]$  时,选择正斜对角线方向;当相角范围为  $[-\pi/8, -3\pi/8)$  时,选择负斜对角线方向;当相角范围为  $(3\pi/8, \pi/2)$  和  $[-3\pi/8, -\pi/2)$  时,选择垂直方向.相角范围与结构元素对应关系如表 1 所示.

表 1 相角范围与结构元素的对应关系

Tab.1 Correspondence between phase angle ranges and structural elements

相角范围 $\theta$	梯度方向	结构元素方向
$\frac{3}{8}\pi < \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 或 $-\frac{\pi}{2} < \theta \leq -\frac{3}{8}\pi$		$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
$\frac{\pi}{8} < \theta \leq \frac{3}{8}\pi$		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$-\frac{\pi}{8} < \theta \leq \frac{\pi}{8}$		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$-\frac{3}{8}\pi < \theta \leq -\frac{\pi}{8}$		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

在自适应形态结构元素提取边缘后,采用基于形态学的细化方法对边缘进行细化操作,在保证连通性和拓扑结构的前提下,移除冗余像素,获得规则平滑的边缘<sup>[17]</sup>.

### 2.3 火焰反应面区边缘提取结果

为验证本文方法的有效性, 将其与传统的边缘检测方法进行对比, 如表 2 所示, 包括 Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子及采用圆形结构元素的形态学方法. 在使用这些方法时对参数进行了多次的调整, 确保参数配置为最优. 不同方法的参数设置如下, Prewitt 算子和 Sobel 算子的阈值均为 0.01. 基于高阈值是低阈值的 3 倍这一原则, Canny 算子的低阈值设置为 0.01, 高阈值设置为 0.03. Prewitt 算子和 Sobel 算子识别出的反应面边缘存在错误, Canny 算子虽能够识别出反应面区的边缘, 但在上部 and 右下部位出现了断裂. 这可能是由于反应面较薄, 其边缘与周围像素的灰度差异较小, 导致梯度变化不明显造成的. 形态学方法能够较为完整地识别出反应面的边

表 2 不同边缘检测方法的结果对比

Tab.2 Comparison of results of different edge detection methods

算子	0 ms	40 ms	80 ms	120 ms
原始图像				
Prewitt 算子				
Sobel 算子				
Canny 算子				
圆形形态学方法				
圆形形态学加入细化				
本文方法				

缘, 但反应面区上部出现了断裂且边缘较粗. 在形态学处理中加入细化操作后, 边缘粗糙的问题得到了改善. 本文方法检测出的边缘清晰, 且连续性和完整性较好. 表 2 中 0、40、80、120 ms 表示从实验起始瞬间开始计时的时间戳. 多个时刻的分割结果表明, 在处理大量连续照片时, 本文方法表现出较高的适应性和稳定性, 能够应对火焰形态的动态变化, 确保边缘提取结果的一致性.

### 3 火焰区域的分割

#### 3.1 反应物和预热区边缘确定

反应物和预热区的上边缘和反应面区的下边缘相同, 可通过消除反应面区上边缘的方法获得. 利用反应面区上、下边缘之间存在的空隙特征, 通过按列搜索的方法实现上边缘的消除, 提取过程如图 3 所示.

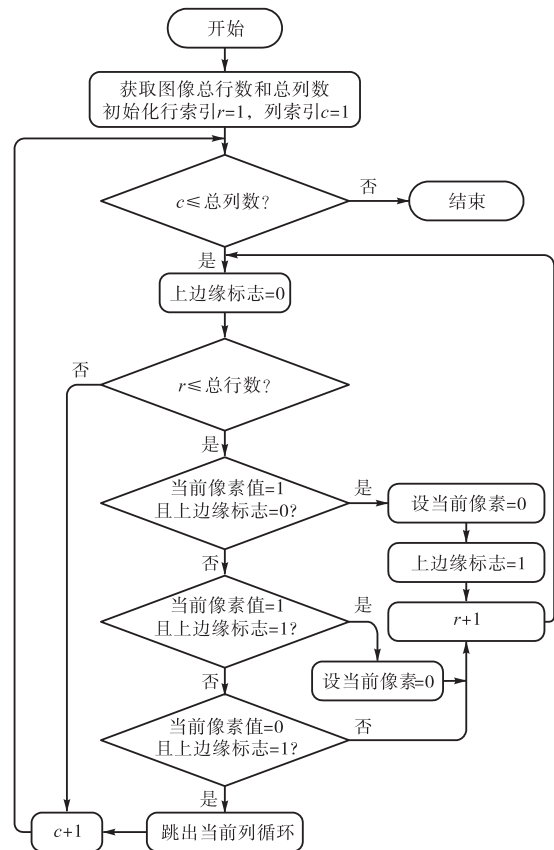


图 3 反应物和预热区的上边缘提取过程

Fig.3 Upper edge extraction process of reactants and preheating zones

反应物和预热区的下边缘通过连接左、右两侧的最底端位置来实现. 从高度较高的一侧出发, 向另一侧绘制直线, 到遇到像素值为 1 的位置为止, 从而实现反应物区的闭合连接, 如图 4 所示.

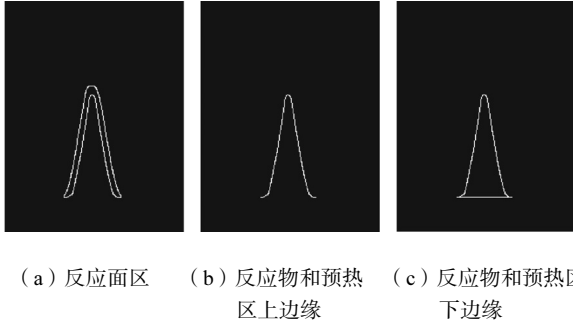


图 4 反应物和预热区边缘  
Fig.4 Reactants and preheating zone edges

### 3.2 火焰外边缘提取

采用 Otsu 方法<sup>[18]</sup>分割图像中的火焰区域与背景区域。

统计图像中像素灰度为  $j$  的概率为

$$p_j = \frac{n_j}{n} \quad (9)$$

式中:  $n$  为图像中的像素总数;  $n_j$  为图像中灰度为  $j$  的像素数。

设阈值为  $T$ , 将图像像素分为 A 和 B 两类, 两类的概率和像素平均灰度为

$$\begin{cases} p_A(T) = \sum_{j=0}^T p_j \\ m_A(T) = \frac{\sum_{j=0}^T jp_j}{p_A(T)} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} p_B(T) = \sum_{j=T+1}^{255} p_j \\ m_B(T) = \frac{\sum_{j=T+1}^{255} jp_j}{p_B(T)} \end{cases} \quad (11)$$

两个类别的方差为

$$\sigma^2 = p_A(T)p_B(T)[m_A(T) - m_B(T)]^2 \quad (12)$$

通过最大化类间方差  $\sigma^2$  来确定最佳阈值  $T$ , 从而实现最佳图像分割效果。分割完成后, 应用闭运算<sup>[19]</sup>对二值化后的图像进行处理, 以去除火焰区域中的空洞和噪声, 进一步提升火焰区域的完整性和分割精度。

### 3.3 火焰 3 个区域的划分

采用种子点填充算法<sup>[20-21]</sup>将反应面区轮廓、反应物和预热区轮廓转换为区域。然后, 通过逻辑或操作将反应区、反应物和预热区合并。接对整个火焰区域和合并区域进行逻辑差集操作, 以提取预混火焰中的产物区域。最后, 将不同的区域以不同的颜色进行映射, 如图 5 所示。

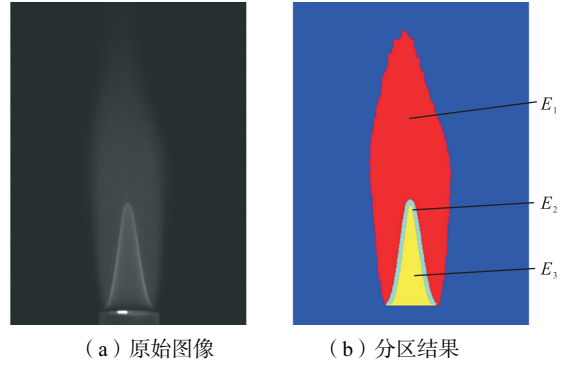


图 5 预混火焰分区结果  
Fig.5 Results of premixed flame zoning

## 4 预混火焰分区闪烁特性研究

### 4.1 燃烧工况

实验设置了 3 种燃料、3 种空气总流量和 6 种当量比, 共计 18 种燃烧工况, 如表 3 所示。图 6 为工况 12 的预混火焰图像序列和区域分割结果。

表 3 18 种燃烧工况

Tab.3 18 combustion conditions

工况	空气总流量/ (L/min)	当量比	甲烷流量/ (L/min)	空气流量/ (L/min)
1	4.36	0.8	0.34	4.02
2		0.9	0.38	3.98
3		1.0	0.41	3.95
4		1.1	0.45	3.91
5		1.2	0.49	3.87
6		1.3	0.52	3.84
7	5.36	0.8	0.42	4.94
8		0.9	0.46	4.90
9		1.0	0.51	4.85
10		1.1	0.56	4.80
11		1.2	0.60	4.76
12		1.3	0.64	4.72
13	6.36	0.8	0.49	5.87
14		0.9	0.55	5.81
15		1.0	0.60	5.76
16		1.1	0.66	5.70
17		1.2	0.71	5.65
18		1.3	0.76	5.60

### 4.2 分区亮度与功率谱密度

为了量化预混火焰在不同区域的亮度特性, 定义分区亮度  $L_i$  为

$$L_i = \frac{\sum_{(x,y) \in E_i} I(x,y)}{N_i} \quad i=1,2,3 \quad (13)$$

式中:  $N_i$  为  $E_i$  分区内的像素数;  $I(x,y)$  为坐标  $(x,y)$  处像素的灰度值。分区亮度  $L_i$  反映了区域的整体亮度特性。排除了火焰形状和像素分布的干扰, 直观展示了区域亮度。

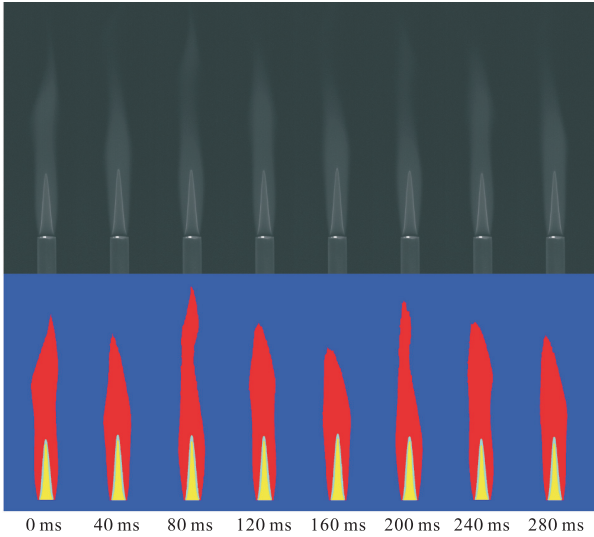


图 6 工况 12 的图像序列和区域分割结果

Fig.6 Image sequence and region segmentation results of case 12

针对火焰图像序列中 3 个分区, 分别计算分区亮度. 图 7 展示了工况 3、9 和 15 的分区亮度的时间序列, 分别对应着总流量为 4.36 L/min、5.36 L/min 和 6.36 L/min 且当量比为 1.0 的燃烧条件. 反应面区亮度最高, 反应物区和预热区次之, 产物区亮度最低. 并且随着总流量的增加, 3 个分区的亮度也在相应增加.

对分区亮度时间序列求取功率谱密度, 如图 8 ~ 10 所示. 反应面区、反应物和预热区的亮度的波动包含多种频率成分, 且主要集中在 0 ~ 15 Hz 的范围. 而产物区在功率谱密度存在一个突出的尖峰, 说明其亮度的波动呈现很强的周期性, 其频率即为通常所说的闪烁频率.

采用火焰整体图像对闪烁频率进行估计时, 功率谱密度分析中除闪烁频率外通常还包含多种频率成分<sup>[22]</sup>. 本文的研究结果说明这一现象是预混火焰各

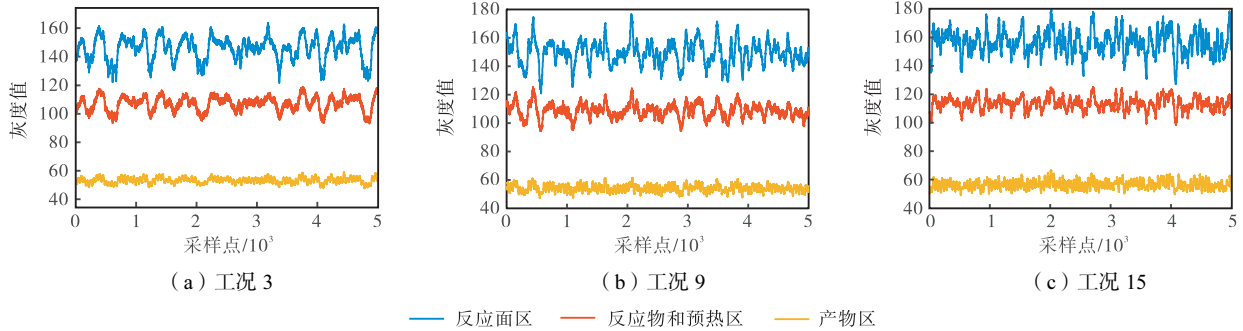


图 7 当量比为 1.0 时不同总流量的闪烁信号时间序列

Fig.7 Time series of flicker signals at different total flow rates for an equivalence ratio of 1.0

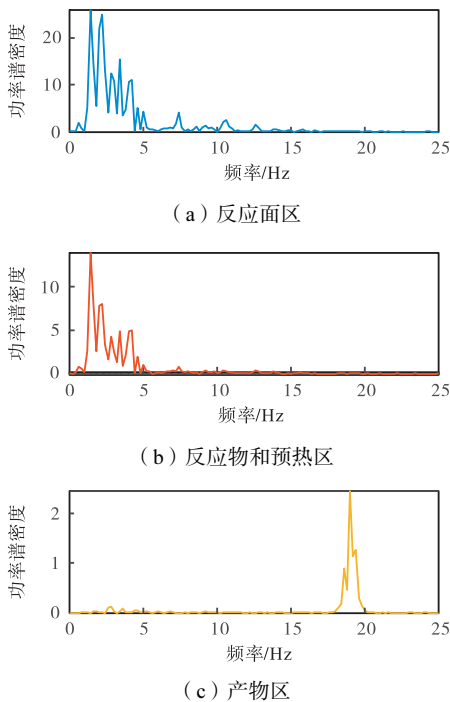


图 8 工况 3 的功率谱密度

Fig.8 Power spectral densities for case 3

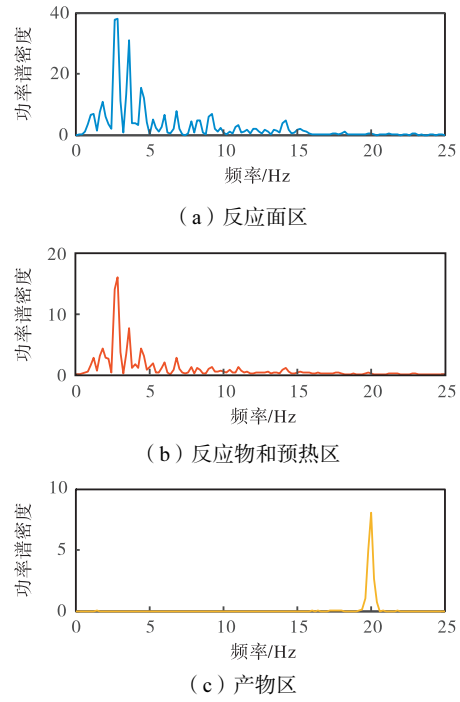


图 9 工况 9 的功率谱密度

Fig.9 Power spectral densities for case 9

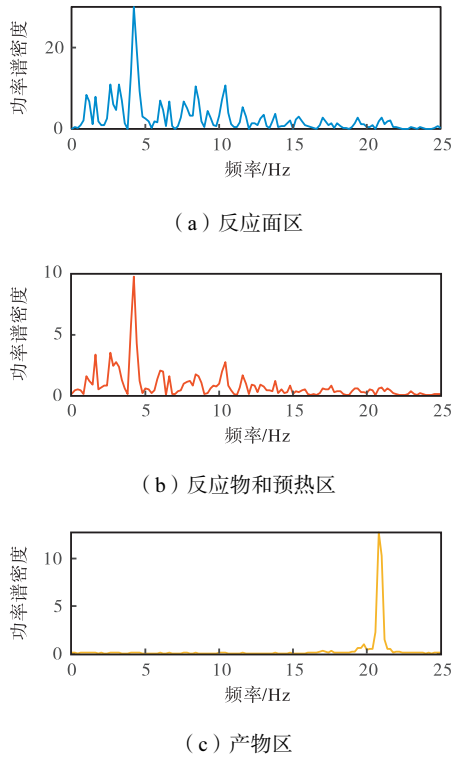


图 10 工况 15 的功率谱密度

Fig.10 Power spectral densities for case 15

分区波动的综合体现. 文献[23]的研究表明火焰产物区的热产物与周围冷空气之间的速度差形成了周期性的漩涡,从而使火焰产生周期性的闪烁. 该闪烁机理与本文发现的产物区的亮度波动反映闪烁频率是一致的.

### 4.3 产物区的闪烁频率

18 种燃烧条件下产物区的闪烁频率随总流量和当量比的变化曲线如图 11 所示. 发现燃料和空气总流量越大,闪烁频率越高. 在相同燃料和空气总流量条件下,闪烁频率随当量比变化,当量比为 1.0 时,闪烁频率最大;在当量比小于 1.0 的贫燃状态,闪烁频率随着当量比的增加而增加;而在当量比大于 1.0 的富燃状态,闪烁频率随着当量比的增加而降低.

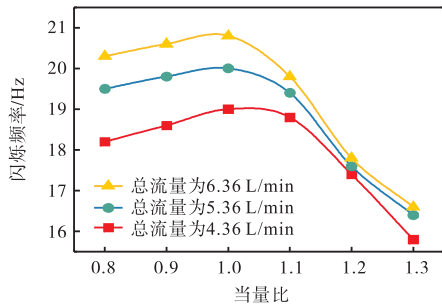


图 11 产物区闪烁频率随总流量和当量比的变化曲线

Fig.11 Variation curves of flicker frequency with total flow and equivalence ratio in product area

## 5 结 论

为了满足预混火焰分区闪烁特性图像法测量的需求,本文提出了一种基于自适应形态结构元素的火焰反应面区边缘提取方法. 以此为基础,建立了反应面区、反应物和预热区、产物区的划分方法,并分析了不同流量、不同当量比条件下,本生预混火焰不同分区的闪烁特性. 主要结论如下.

(1) 基于平方梯度向量计算各个像素点的平均梯度方向,并自适应构成不同方向的形态结构元素,能够实现预混火焰反应面区边缘的提取.

(2) 预混火焰不同区域因其独特的燃烧过程而呈现出不同的波动特点,其多种频率构成的低频部分主要来源于反应面区、反应物和预热区,而闪烁频率主要来源于产物区亮度的波动.

(3) 预混火焰产物区闪烁频率与总流量成正比关系,在相同总流量条件下,贫燃状态,闪烁频率随着当量比的增加而增加;富燃状态,闪烁频率随着当量比的增加而降低;当量比为 1.0 时,闪烁频率最大.

### 参考文献:

[1] 王 超, 甄 郅 卓, 曹 晓 宁, 等. 预混火焰离子/电子电流区域性差异研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(8): 828-835.  
Wang Chao, Zhen Zhizhuo, Cao Xiaoning, et al. Regional differences in ion and electron currents in pre-mixed flames[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57(8): 828-835 (in Chinese).

[2] Ojo A O, Escofet-Martin D, Peterson B. High-precision 2D surface phosphor thermometry at kHz-rates during flame-wall interaction in narrow passages[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(1): 1455-1463.

[3] Kotyra A, Wójcik W, Sawicki D, et al. Environmental Engineering V[M]. London: CRC Press, 2018: 291-298.

[4] Gaur A, Singh A, Kumar A, et al. Video flame and smoke based fire detection algorithms: A literature review[J]. Fire technology, 2020, 56: 1943-1980.

[5] Takahashi N, Suzuki M, Dobashi R, et al. Behavior of luminous zones appearing on plumes of large-scale pool fires of kerosene[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33(1): 1-10.

[6] Ferrero F, Munoz M, Arnaldos J. Thin-layer boilover

- in diesel-oil fires: Determining the increase of thermal hazards and safety distances[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1/2): 361-368.
- [7] Gergely A, Paizs C, Tötös R, et al. Oscillations and collective behavior in convective flows[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(12): 124104.
- [8] Li H H, Tang F. Effect of sub-atmospheric pressures on buoyancy-dominated hydrocarbon fuel fires: An experimental analysis on thermal flickering frequency[J]. *Fire and Materials*, 2022, 46(5): 762-770.
- [9] González-Cencerrado A, Gil A, Peña B. Characterization of PF flames under different swirl conditions based on visualization systems[J]. *Fuel*, 2013, 113: 798-809.
- [10] Fujisawa N, Abe T, Yamagata T, et al. Flickering characteristics and temperature field of premixed methane/air flame under the influence of co-flow[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 374-385.
- [11] Lu G, Yan Y, Colechin M, et al. Monitoring of oscillatory characteristics of pulverized coal flames through image processing and spectral analysis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(1): 226-231.
- [12] Zhou B, Brackmann C, Wang Z, et al. Thin reaction zone and distributed reaction zone regimes in turbulent premixed methane/air flames: Scalar distributions and correlations[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 175: 220-236.
- [13] 杨爱萍, 王子麒, 程思萌, 等. 基于分层解码和渐进融合的快速显著性目标检测[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2024, 57(7): 721-728.  
Yang Aiping, Wang Ziqi, Cheng Simeng, et al. Fast salient object detection based on layered decoding and progressive fusion[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2024, 57(7): 721-728 (in Chinese).
- [14] Shah B K, Kedia V, Raut R, et al. Evaluation and comparative study of edge detection techniques[J]. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 2020, 22(5): 6-15.
- [15] Zhen H, Miao J, Leung C W, et al. A study on the effects of air preheat on the combustion and heat transfer characteristics of Bunsen flames[J]. *Fuel*, 2016, 184: 50-58.
- [16] Legaz-Aparicio Á G, Verdu-Monedero R, Angulo J. Multiscale estimation of multiple orientations based on morphological directional openings[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2018, 12: 1245-1253.
- [17] Brown J, Hoger A. A morphological point thinning algorithm[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1996, 17(2): 197-207.
- [18] 汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现[J]. *自动化学报*, 2007, 33(9): 968-971.  
Wang Haiyang, Pan Delu, Xia Deshen. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 968-971 (in Chinese).
- [19] Cheng C H, Yang D L. Realisation of morphological operations[J]. *IEE Proceedings—Circuits, Devices and Systems*, 1995, 142(6): 364-368.
- [20] Geraets W G M, Van Daatselaar A N, Verheij J G C. An efficient filling algorithm for counting regions[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2004, 76(1): 1-11.
- [21] Xin H Y, Nahar S, Zhu R, et al. Optimal seed solver: Optimizing seed selection in read mapping[J]. *Bioinformatics*, 2016, 32(11): 1632-1642.
- [22] Huang Y P, Yan Y, Lu G, et al. On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(8): 726.
- [23] Yang Y, Fang Y Q, Zhong L, et al. DMD analysis for velocity fields of a laminar premixed flame with external acoustic excitation[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 123: 110318.

(责任编辑: 孙立华)