

## 尾焰的紫外高分辨辐射图像仿真与特征提取

张丹萌, 白璐\*, 吕强, 王岩坤, 谢锦宇

(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 基于改进的球谐离散坐标法建立了飞行器尾焰的紫外辐射亮度仿真模型。在尾焰羽流的热辐射基础上, 重点考虑了尾焰中气体分子的化学荧光辐射源及由尾焰中三氧化二铝簇团粒子的平均光学特性带来的多重散射源效应。基于辐射传输方程, 在球谐离散坐标系中, 对尾焰在不同观测角度、不同介质分布的紫外辐射亮度进行了数值计算, 实现了高分辨的三维尾焰辐射亮度的空间分布图像仿真。同时, 采用灰度共生矩阵算法获得尾焰辐射亮度分级分布的灰度图, 结合二维超分辨率旋转不变子空间算法、 $\alpha$ -shape 方法和橡皮筋算法, 提出了尾焰辐射中心位置和辐射亮度峰值轮廓曲线提取的新方法, 得到了尾焰辐射亮度特征的准确提取, 为飞行器目标和尾焰的高分辨率辐射图像特征识别提供了重要的参考依据和途径。

**关键词:** 尾焰; 紫外辐射; 橡皮筋算法; 改进的球谐离散纵坐标法

中图分类号: V419 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200466

## Image simulation and feature extraction of UV high resolution radiation of plume

Zhang Danmeng, Bai Lu\*, Lv Qiang, Wang Yankun, Xie Jinyu

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A simulation model of the ultraviolet (UV) radiance of the aircraft plume was established based on the improved spherical harmonic discrete coordinate method (SHDOM). Based on the thermal radiation of the plume, the modified model took into account the chemiluminescence of gas molecules and multiple scattering source caused by the average optical properties of cluster particles in the plume. On account of the basic radiation transfer equation, the UV radiation of the plume at different observation angles and medium distribution was numerically calculated in the spherical harmonic discrete coordinate system, and the space distribution images simulation of high resolution three-dimensional (3-D) plume radiance was presented. At the same time, the gray-scale co-occurrence matrix (GLCM) algorithm was used to obtain the gray-scale map of the plume radiation distribution. Combined with two-dimensional super resolution rotational invariant subspace algorithm,  $\alpha$ -shape method and the rubber band algorithm, the central position and peak contour curve of the plume radiation was calculated, and the accurate extraction of the plume radiance feature was obtained, which provide an important reference and approach for the high resolution radiation image feature recognition of aircraft target and plume.

**Key words:** plume; UV radiation; rubber band algorithm; improved SHDOM

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61875156, U20B2059)

作者简介: 张丹萌, 女, 博士生, 主要从事尾焰紫外辐射特征建模及识别方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 白璐, 女, 博士生导师, 博士, 主要从事光在离散随机介质中的散射与传播方面的研究。

## 0 引言

飞行器的探测感知一直是国内外学者非常感兴趣的话题,随着各国超音速飞行器的快速发展,对其进行追踪和探测具有特别重要的意义。相比于飞行器本身,飞行器的尾焰的红外和紫外辐射都有着非常显著的特性<sup>[1]</sup>,成为目标探测与识别的研究热点。近年来,国内外也开始围绕尾焰成像进行广泛而深入的研究,如刘方等人<sup>[2]</sup>使用多项式拟合与降趋势波动性分析方法对随时间与空间连续变化的尾焰的可见光图像进行建模分析。刘连伟等人<sup>[3]</sup>则采用反向光线追迹方法来计算了尾焰的红外辐射亮度,使用自开发软件生成不同观测角度的目标红外光谱图像。

虽然高速飞行器尾焰的光谱辐射的主要能量峰值在红外波段<sup>[4]</sup>,但根据黑体辐射理论,随着温度的升高,辐射能量集中的波段会向短波方向移动。同时,飞行器尾焰中存在大量的气体分子(例如 NO 和 OH)和三氧化二铝粒子在紫外波段存在明显的辐射特性<sup>[5]</sup>。因此,文中主要聚焦于飞行器尾焰的紫外辐射模型与图像特征的提取方法研究。

尾焰的紫外辐射源可分为尾焰羽流的热辐射、尾焰中气体分子发生化学反应产生的化学荧光辐射及由尾焰中簇团粒子引起的多重散射效应。其中,化学反应产生的荧光辐射作为紫外波段独特的源,使得尾焰在紫外波段背景中可以更好地被识别。因此,文中使用了改进的球谐离散坐标法对尾焰紫外辐射亮度进行仿真,该方法针对尾焰的紫外辐射问题考虑了化学反应产生的荧光辐射源对辐射场的贡献。之后,对轴向光学特性变化的羽流状三维尾焰的辐射特征进行了计算与分析。并使用灰度级共生矩阵对得到的光谱图像进行了特征分析,根据尾焰紫外光谱图像的特征,结合辐射中心提取的二维超分辨率不变子空间算法和轮廓提取的橡皮筋算法,实现了尾焰高分辨率紫外辐射亮度特征的准确提取。

## 1 尾焰紫外高分辨率辐射图像的仿真模型

### 1.1 飞行器尾焰的紫外辐射传输模型

飞行器尾焰可以简化为一个具有辐射、吸收和散

射特性的轴对称介质,其中气体分子的化学荧光辐射、氧化铝粒子热辐射和氧化铝粒子散射是影响飞行器尾焰紫外辐射特性的主要因素。根据尾焰的紫外辐射机理,可以建立固体燃料飞行器尾焰的紫外辐射传输模型。

在飞行器尾焰的紫外辐射场中,沿探测角 $\Omega$ 在点 $s$ 处的单色辐射传输方程<sup>[6]</sup>为:

$$\frac{1}{\sigma(s, \lambda)} \frac{dI_\lambda(s, \Omega)}{d\Omega} = -I_\lambda(s, \Omega) + J_\lambda^{all}(s, \Omega) \quad (1)$$

式中: $I_\lambda(s, \Omega)$ 表示在 $s$ 点沿 $\Omega$ 方向传输的光谱辐射亮度; $\sigma(s, \lambda)$ 表示消光系数; $J_\lambda^{all}(s, \Omega)$ 为总源函数,可以表示为:

$$J_\lambda^{all}(s, \Omega) = J_\lambda^H(s, \Omega) + J_\lambda^C(s, \Omega) + J_\lambda^{Sca}(s, \Omega) \quad (2)$$

式中: $J_\lambda^H(s, \Omega)$ 和 $J_\lambda^C(s, \Omega)$ 分别表示粒子热辐射和气体分子化学荧光辐射的辐射源函数; $J_\lambda^{Sca}(s, \Omega)$ 为氧化铝粒子的内散射源函数。文中在对不同基本粒子个数 $N_s$ 对应的三氧化二铝簇团粒子相函数进行统计平均后,将散射相函数作为内散射源函数 $J_\lambda^{Sca}(s, \Omega)$ 的组成部分。散射源函数可写作:

$$J_\lambda^{Sca}(s, \Omega) = \frac{\Omega_0(s, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s; \lambda; \Omega' \rightarrow \Omega) I_\lambda(s, \Omega') d\Omega' \quad (3)$$

式中: $\Omega_0(s, \lambda)$ 为粒子的单次散射反照率; $\Phi(s; \lambda; \Omega' \rightarrow \Omega)$ 为散射相函数。

飞行器尾焰沿 $\Omega$ 方向传输的紫外辐射亮度 $I_\lambda(s, \Omega)$ 可以表示为如下积分形式:

$$I_\lambda(s, \Omega) = I_\lambda(0, \Omega) \exp\left[-\int_0^s \sigma(s', \lambda) ds'\right] + \int_0^s J_\lambda^{all}(s', \Omega) \sigma(s', \lambda) \exp\left[-\int_{s'}^{s''} \sigma(s'', \lambda) ds''\right] ds' \quad (4)$$

气体分子的化学荧光辐射及由尾焰中簇团粒子引起的多重散射效应是紫外辐射考虑的主要源函数。为此,分别做如下讨论和改进。

### 1.2 三维尾焰的紫外荧光辐射源的构建

在之前的文献研究中,将飞行器尾焰视为轴对称的柱状介质,整个尾焰的单次反照率统一设置为

0.8。根据距离喷嘴的远近,将飞行器尾焰按照区域分为四种代表性介质,如图 1 所示,其中介质 M1 和 M2 对应靠近喷嘴的区域,介质 M3 对应后燃烧区,介质 M4 对应尾焰的尾部。这些区域介质的消光系数分布、温度分布、化学荧光辐射发射系数分布各参数如参考文献 [7] 中的表 3 所示,其对应的尾焰区域的消光系数、温度和化学荧光辐射分布仅被看作是四种不同介质并使用圆柱进行近似,这意味着只考虑到了尾焰关于中心轴半径方向的特性变化,忽略了轴向上的连续变化,仿真得到的辐射亮度分布在圆柱轴向上没有变化。

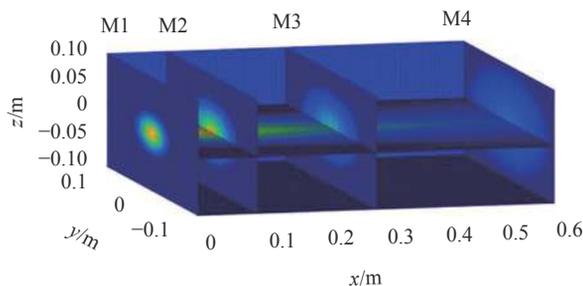


图 1 三维尾焰的结构、介质分区和仿真网格示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3-D plume structure, media partition and simulation grid

而实际上,真实尾焰的介质特性从头部到尾部是随着距离喷嘴远近不断变化的。因此,根据截面对应区域的消光系数分布、温度分布、化学荧光辐射发射系数分布,并结合实际的三维尾焰模型,如图 1 所示,取尾焰长度 0.6 m,喷嘴位置为  $x=0$  处,介质 1、介质 2、介质 3、介质 4 分别对应  $M1=0$  m,  $M2=0.1$  m、 $M3=0.3$  m、 $M4=0.6$  m 处的截面。模型径向半径 0.1 m,空间网格分辨率在  $y$  和  $z$  方向为 0.004 m,  $x$  方向为 0.01 m,对介质属性进行插值,就可以得到一个更真实的轴对称三维尾焰的消光系数、温度和化学荧光辐射分布模型。

图 2 给出了三维尾焰的对称剖面的各辐射参数值。可以看到,尾焰的消光系数峰值分布在尾焰中轴线,并随着尾焰距飞行器喷嘴距离的远离而迅速减弱;尾焰的温度在靠近飞行器部分区域中呈双峰分布,中轴线两侧的温度要比中心温度高,并随着尾焰距飞行器喷嘴距离的远离逐渐汇聚成单峰;而尾焰的荧光化学辐射主要来自尾焰气体的复燃,因此,荧光

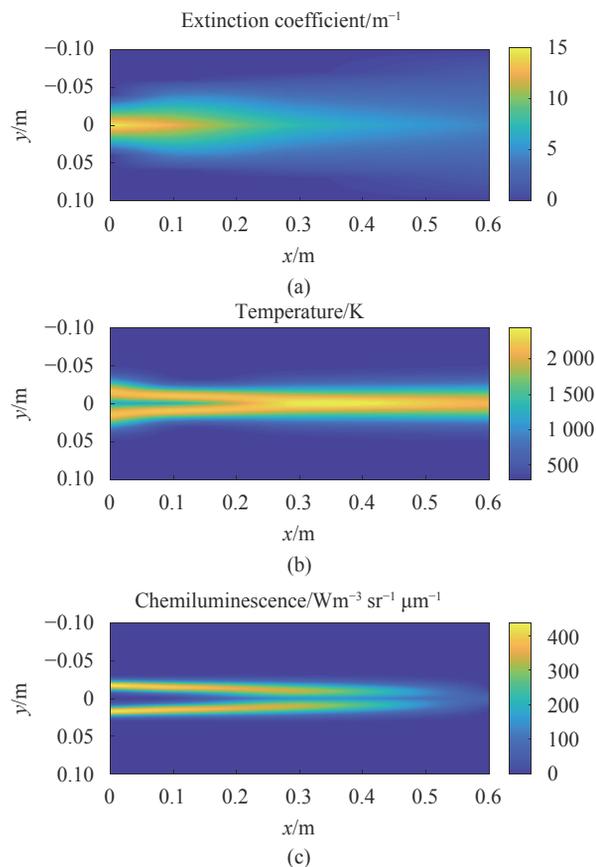


图 2 三维尾焰消光系数、温度和化学荧光辐射分布

Fig.2 3-D plume extinction coefficient, temperature and chemiluminescence emission distribution

辐射源主要分布在尾焰气体与空气交接的外侧。

### 1.3 尾焰簇团粒子散射相函数的平均值法

含铝的固体燃料在燃烧时会产生大量的氧化铝粒子,在高温高压下,这些粒子会凝聚成簇团。对于飞行器尾焰的紫外辐射特性而言,簇团粒子散射相函数模型越接近真实情况,其辐射特性的仿真结果才越精确。为此,提出利用平均值法实现尾焰簇团粒子散射相函数的有效提取,具体步骤如下:

- (1) 利用改进的扩散限制凝聚模型 (DLA) 获得满足对数正态分布的不同粒径簇团粒子几何模型;
- (2) 利用簇团粒子散射的多球 T 矩阵算法 (MSTM) 计算不同簇团粒子的散射特性;
- (3) 利用平均值法统计分析不同基本粒子数目、不同分布和相态的尾焰氧化铝簇团粒子紫外光的平均散射特性,获取氧化铝簇团粒子的散射相函数。

对于高温高压下的尾焰中的氧化铝簇团粒子,基本粒子半径  $r$  和基本粒子个数  $N_s$  均服从对数正态分

布。为此,采用改进后算法生成飞行器尾焰中氧化铝簇团粒子模型<sup>[5]</sup>。

MSTM<sup>[8]</sup> 特别适合于求解簇团粒子散射特性。一束平面波以波矢量  $\vec{k}$  沿  $z$  轴方向入射到由  $N_s$  个基本粒子组成的簇团粒子上,用矢量球谐函数展开入射场和散射场,展开系数通过第  $j$  个组分  $T$  矩阵  $T^j$  联系起来:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}^j \\ \mathbf{q}^j \end{bmatrix} = T^j \left( \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{j0} \\ \mathbf{b}^{j0} \end{bmatrix} + \sum_{l \neq j} \begin{bmatrix} \mathbf{A}(k_l \mathbf{r}_{lj}) & \mathbf{B}(k_l \mathbf{r}_{lj}) \\ \mathbf{B}(k_l \mathbf{r}_{lj}) & \mathbf{A}(k_l \mathbf{r}_{lj}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}^l \\ \mathbf{q}^l \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

式中:  $k_l$  为介质的波数;  $T^j$  为转换矩阵,它将第  $l$  个坐标系的入射场展开系数 ( $\mathbf{a}^{l0}$  和  $\mathbf{b}^{l0}$ ) 转换为第  $j$  个坐标系下散射场的展开系数 ( $\mathbf{p}^j$  和  $\mathbf{q}^j$ )。

则入射场和散射场的振幅关系为:

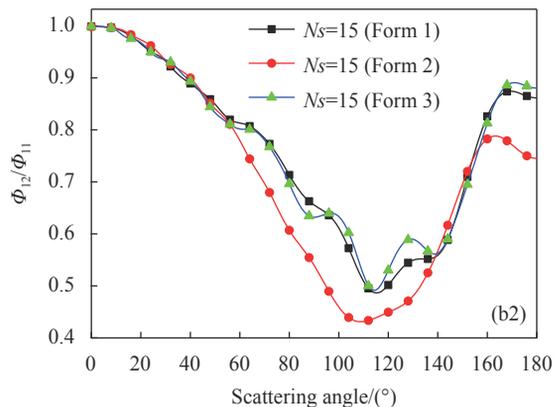
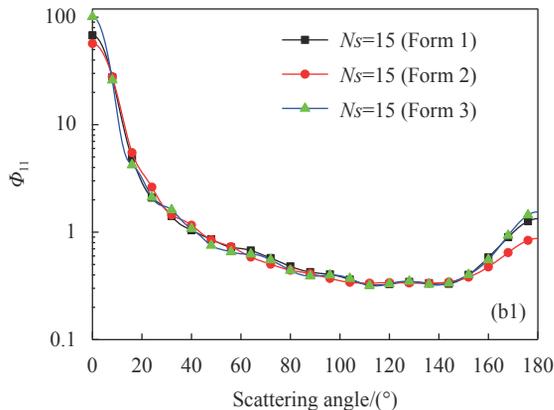
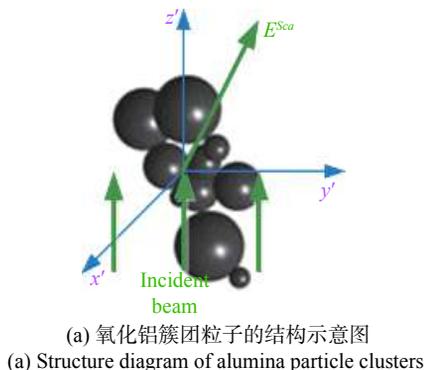
$$\begin{pmatrix} E_{//s} \\ E_{\perp s} \end{pmatrix} = \frac{\exp[ik(r-z)]}{-ikr} \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{//i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$S$  的具体表达式见参考文献 [8], 其中散射相函数与 Stokes 散射矩阵  $S$  的关系为:

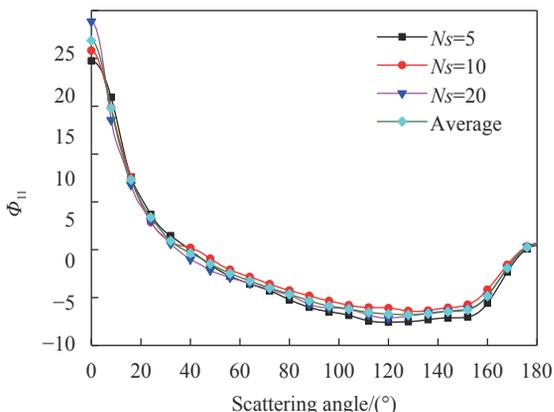
$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= \frac{1}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2) \\ \Phi_{21} &= \frac{1}{2} (|S_2|^2 - |S_1|^2 - |S_4|^2 - |S_3|^2) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\Phi_{11}$  为簇团粒子散射相函数;  $\Phi_{21}/\Phi_{11}$  描述了粒子的线极化特性。

图 3 给出了采用改进的 DLA 算法随机生成的尾焰中氧化铝簇团粒子的结构示意图、基本粒子数目相等但形态不同的氧化铝簇团粒子的散射特性和不同基本粒子数目的氧化铝簇团粒子平均后的散射相函数,其中形式 1、2、3 分别是基本粒子数为 15 但形态不同的三种簇团粒子。从图中可以看到,当氧化铝簇团粒子的基本粒子数目增加时,簇团粒子的散射相函数



(b) 粒子数目相等不同形态的氧化铝簇团粒子的散射特性  
(b) Scattering characteristics of alumina particle clusters with equal number of particles but different shapes



(c) 氧化铝簇团粒子散射相函数的平均值  
(c) Mean values of scattering phase function of alumina particle clusters

图 3 簇团粒子对散射特性的影响

Fig.3 Effects of particle clusters on scattering characteristics

前向散射的值随之变大,簇团粒子的基本粒子数目对散射相函数的大小存在影响。

### 1.4 改进球谐离散坐标法

Evans<sup>[9]</sup> 在计算大气红外和可见光辐射特性时提出了球谐离散坐标法,传统的球谐离散坐标法中,辐

射源考虑太阳辐射和热辐射两种情况下的辐射特性,内散射源函数目前主要考虑气溶胶粒子、水或冰晶粒子的散射特性。而文中飞行器尾焰中的辐射源主要是粒子热辐射和化学荧光辐射,不考虑太阳辐射;内散射源主要考虑氧化铝簇团粒子的散射特性。因此文中通过引入新的荧光辐射源和三氧化二铝簇团粒子散射相函数对原始的球谐离散坐标法进行了改进。

改进的球谐离散坐标法的主要步骤如下:

(1) 针对公式 (2) 中的源函数参数和辐射场初始化,主要包括对飞行器尾焰计算域进行网格剖分、计算各网格节点对应的温度和化学荧光辐射亮度、尾焰中的氧化铝簇团粒子分布、氧化铝簇团粒子散射相函数等。

(2) 引入网格点  $i$  的粒子热辐射和气体分子化学荧光辐射源函数,并与内散射源一起组成该网格点处尾焰紫外辐射的源函数,同时由球谐坐标表示。

(3) 将上一步的源函数转换到离散坐标,根据公式 (4),在离散坐标下对尾焰紫外辐射传输方程沿  $\Omega$  方向通过一个小微分体积的辐射亮度进行求解,并给出沿  $\Omega$  通过一个小微分体积的网格点  $i+1$  处的辐射亮度。

(4) 将网格点  $i+1$  处离散坐标下的辐射亮度转换到球谐坐标下,并作为网格点  $i+1$  处的源函数。

(5) 在每个沿  $\Omega$  通过一个小微分体积的网格单元上重复上述步骤 (1)~(4),直到飞行器尾焰模型计算域的边界,则计算结束并存储边界网格点上的源函数。

(6) 最终将计算结束后的源函数代入公式 (4) 中,并求得沿  $\Omega$  方向观测到的飞行器尾焰紫外辐射亮度。

## 2 尾焰图像轮廓特征的提取方法

在完成尾焰紫外辐射计算工作后,可以直接从尾焰辐射数据入手,对其进行轮廓提取。在进行图像特征的计算时,首先使用灰度级共生矩阵<sup>[2]</sup>(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)算法,将图像的灰度级分为九级,分别求出图像的 GLCM 能量、GLCM 对比度和 GLCM 熵值,各特征值计算方法如下:

$$\begin{aligned} GLCM_A &= \sum_i \sum_j p^2(i, j, d, \theta) \\ GLCM_C &= \sum_i \sum_j p(i, j, d, \theta)(i - j)^2 \\ GLCM_E &= \sum_i \sum_j p(i, j, d, \theta) \ln p(i, j, d, \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $p(i, j, d, \theta)$  为图像的灰度共生矩阵;  $(i, j)$  表示图像矩阵的第  $i$  行  $j$  列的元素;  $d$  为像素点之间的距离;  $\theta$  为横轴正方向与像素点连线之间的角度。

文中采用了基于  $\alpha$ -shape 算法和橡皮筋的目标轮廓提取法<sup>[10]</sup>实现尾焰的轮廓提取。首先使用  $\alpha$ -shape 方法来提取出辐射中心的位置,其主要原理为:假设一个足够大的圆在一堆无序二维点集外滚动,滚动得到的轨迹即为点集的边界线。滚动圆心的坐标  $(x_3, y_3)$  的计算方法为:

$$\begin{cases} x_3 = x_1 + \frac{1}{2}(x_2 - x_1) + H(y_2 - y_1) \\ y_3 = y_1 + \frac{1}{2}(y_2 - y_1) + H(x_1 - x_2) \end{cases} \quad (9)$$

$$H = \sqrt{\alpha^2 / [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] - 1/4} \quad (10)$$

其中,点集中任意一点的坐标为  $P_1(x_1, y_1)$ ,与  $P_1$  距离小于  $2\alpha$  的点构成的子集区域内的任意一点  $P_2$  的坐标为  $(x_2, y_2)$ ,圆的半径为  $\alpha$ 。最后,橡皮筋算法使用闭合的平滑曲线将尾焰目标边缘处的辐射中心连接起来,从而获得更为精确的尾焰辐射轮廓模型。

基于  $\alpha$ -shape 技术的尾焰目标轮廓提取的具体步骤如下:

(1) 使用改进的 SHDOM 对尾焰模型进行计算,并获得辐射亮度分布灰度图;

(2) 利用二维超分辨旋转不变子空间 (2D U-ES-PRIT) 算法提取尾焰图像的辐射中心位置信息;

(3) 利用  $\alpha$ -shape 方法,获取位于边缘处的辐射中心的位置;

(4) 使用橡皮筋法得到尾焰图像的闭合轮廓曲线。

## 3 仿真结果分析

首先考虑图 1 所示的三维尾焰模型。

使用改进的 SHDOM 对该模型的辐射亮度进行估算,取紫外辐射波长 280 nm,角度分辨率为 16 个天顶角,32 个方位角,观测方位角与  $x$  轴夹角  $0^\circ$ ,则不同观测角下尾焰的辐射亮度分布结果如图 4 所示。可以看到,尾焰的辐射亮度分布会随尾焰轴向不断变化,在尾焰前部辐射亮度随半径成对称的双峰分布,而在尾焰尾部,辐射逐渐减弱并慢慢汇聚成单峰分布;当观测方向与尾焰方向垂直时,尾焰辐射亮度分布与其介质分布形状相似,而当观测方向趋近于尾焰

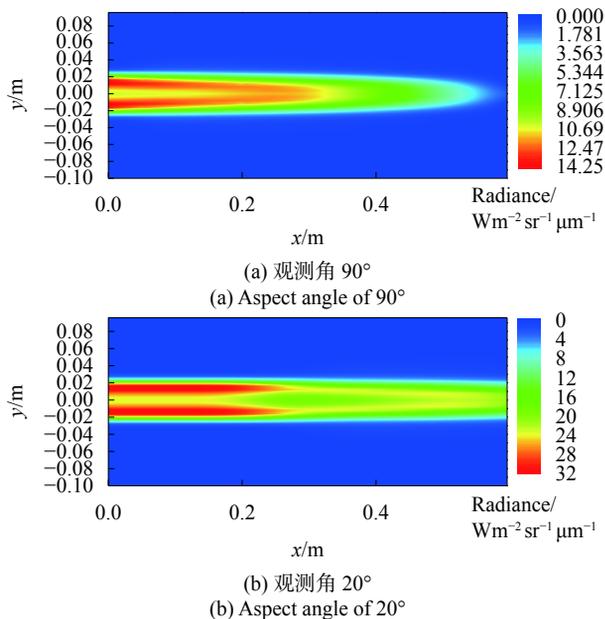


图 4 不同观测角下三维尾焰的辐射亮度分布

Fig.4 Radiance distribution of three dimensional plume at different aspect angles

轴向时,尾焰在  $xoy$  平面上的投影被拉伸,且整体更亮,尾焰辐射逐渐受到整个尾焰介质的影响。

根据以上得到的三维尾焰辐射亮度分布图,使用

灰度级共生矩阵算法进行计算,可以分别得到火箭尾焰辐射图像特征的定量化准确描述及分级后尾焰紫外辐射的灰度图,结果如表 1 和图 5 所示。可以看出,当观测方向与尾焰方向接近时,如图 5(b) 所示,尾焰辐射亮度分布比图 5(a) 整体更强、更亮,在 GLCM 能量、对比度和熵的数值上更大,辐射强点主要出现在尾焰近外围区域。

针对图 5 中不同观测角下的尾焰辐射分布,根据灰度分级算法计算出尾焰图像辐射强点的具体位置之后,采用  $\alpha$ -shape 和橡皮筋方法实现尾焰辐亮度轮廓特征的准确提取,图 6(a)~(c) 给出了垂直观测时的尾焰强点轮廓提取步骤,图 6(d)~(f) 则分别给出了观测角  $70^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $20^\circ$  时的尾焰强点的轮廓提取结果。

如图 6 所示,辐亮度峰值部分约占全部尾焰的 30% 左右,且在不同观测角度下,尾焰的辐射中心分布图有着明显的差异。垂直观测时,尾焰的主要能量集中在尾焰中央区域,而近轴向观测时,尾焰强点主要逐渐出现在近喷嘴处的尾焰外围。文中提出的三维尾焰紫外辐亮度模型可以显著体现这种与实际观测相符的特征。同时,通过结合辐射中心提取的  $\alpha$ -shape 算法和橡皮筋算法可以获得更为精确的辐射强

表 1 图像特征计算结果

Tab.1 Results of image feature calculation

Image name	GLCM energy	GLCM contrast	GLCM entropy value	Image name	First-order moment	Second-order moment
Fig.3(a)	195 157	2.35e+8	50 000	Fig.3(a)	1.9127	2.0834e-08
Fig.3(b)	24 011 556	8.08e+12	6.48e+6	Fig.3(b)	7.4272	1.2360e-07

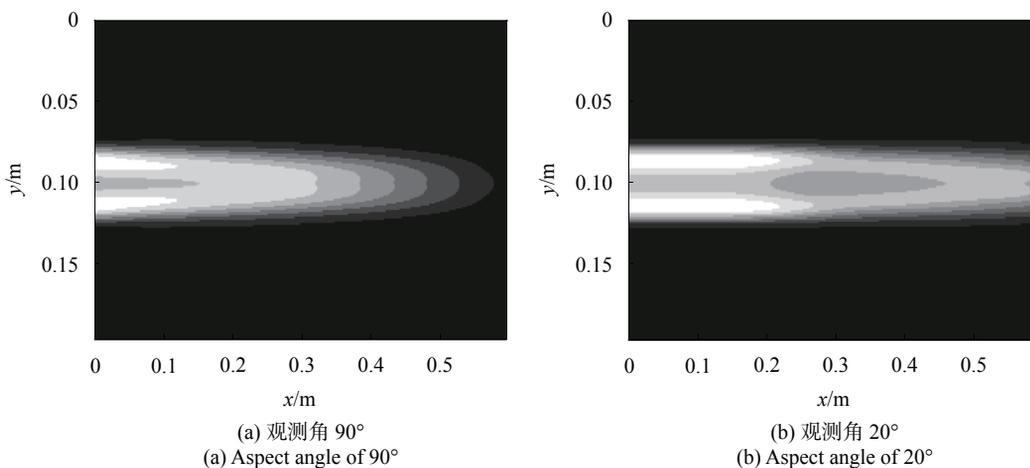


图 5 分级后的尾焰紫外辐射灰度图

Fig.5 Grayscale image of the UV radiation of the plume after classification

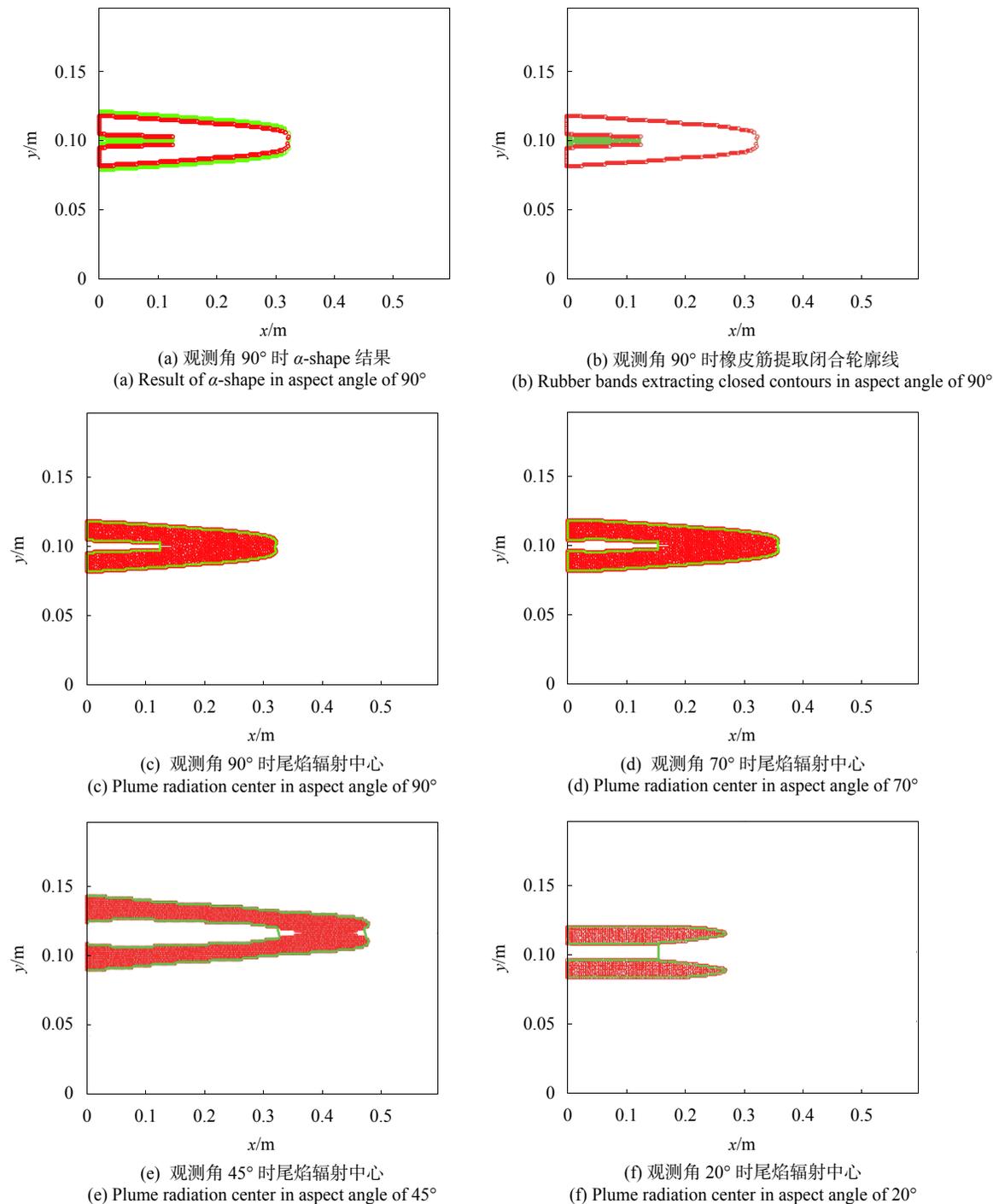


图 6 尾焰辐射中心的轮廓提取

Fig.6 Outline extraction of plume radiation center

度图像轮廓模型,有效提高尾焰紫外辐射特征提取的准确率,为飞行器目标和尾焰的高分辨辐射图像特征识别提供依据和途径。

#### 4 结 论

文中围绕火箭尾焰中紫外辐射亮度的特征仿真

和提取方法进行了研究。通过改进的 SHDOM 算法计算了含有三个辐射源项的三维尾焰的紫外辐射亮度分布图像,并完成图像特征值计算。使用辐射中心提取法和橡皮筋算法得到更为精确的尾焰辐射轮廓模型。仿真结果表明,在观测角靠近尾焰轴向时,尾焰辐射强点的轮廓曲线接近尾焰外围,且辐亮度更

强。通过对尾焰辐亮度高分辨图像的轮廓提取可以获得更准确的图像特性,从而为尾焰辐射亮度图像特征的识别提供新的研究方法。

#### 参考文献:

- [1] Blanc A, Deimling L, Eisenreich N. UV and IR-signatures of rocket plumes [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2002, 27(3): 185-189.
- [2] Liu Fang, Xiao Jinshi, Liu Haoting. A kind of spatial and temporal Image feature modeling method of rocket plume [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 37(4): 34-37. (in Chinese)
- [3] Liu Lianwei, Dong Shikui, Chen Qianrong. Infrared radiation imaging calculation of aerial target based on CUDA parallel computing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0404003. (in Chinese)
- [4] Bao Xingdong, Yu Xilong, Wu Jie, et al. Numerical study of flow and ultra narrow spectrum infrared radiation characteristics of high-altitude plume under thin atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200159. (in Chinese)
- [5] Zhang D M, Bai L. Effects of alumina particle clusters on UV radiation signature in the aircraft plume [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 252: 107082.
- [6] Roblin A, Baudoux P E, Chervet P. UV missile plume signature model [C]//Targets and Backgrounds VIII: Characterization and Representation, ONERA, 2002, 4718: 344-355.
- [7] Baudoux P E, Roblin A, Chervet P. New approach for radiative-transfer computations in axisymmetric scattering hot media [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2001, 15(3): 317-325.
- [8] Mackowski D W, Mishchenko M I. Calculation of the T matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(11): 2266-2278.
- [9] Evans K F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(3): 429-446.
- [10] Hao Zhenghui, Zhang Xuesong, Wang Gao, et al. Auto focusing evaluation function based on edge contour extraction [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(2): 170-175. (in Chinese)