

doi:10.3788/gzxb20184708.0826001

基于蒙特卡洛法的尾焰红外辐射特性 仿真与试验

郑海晶¹, 白廷柱¹, 王全喜²

(1 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(2 海军装备研究院 系统所, 北京 100073)

摘 要: 根据尾焰中气体的吸收特性, 基于蒙特卡洛法建立了尾焰红外辐射特性模型, 并用该模型计算了某型发动机尾焰在 5 个不同红外波段的辐射特性(1.32~1.69 μm , 1.56~2.27 μm , 2.27~3.8 μm , 3.8~8.3 μm , 8.3~20 μm). 为了验证仿真模型的有效性, 进行了发动机点火试验. 试验结果与仿真结果表明该型涡喷发动机在 2.27~3.8 μm 波段辐射最强, 在长波波段 8.3~20 μm 辐射面积最大.

关键词: 物理光学; 辐射效应; 红外吸收光谱; 尾焰; 蒙特卡洛

中图分类号: O432.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0826001-15

Numerical Simulation and Experiment on Infrared Features of Exhaust Plume Based on Monte Carlo Method

ZHENG Hai-jing¹, BAI Ting-zhu¹, WANG Quan-xi²

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 System Division, Navy Equipment Research Institute, Beijing 100073, China)

Abstract: According to the absorption characteristics of exhaust plume, a numerical model of the infrared radiation characteristics of the exhaust plume based on Monte Carlo method is set up. Then, the infrared radiation characteristics of exhaust plumes from an engine are simulated in the five infrared bands (1.32~1.69 μm , 1.56~2.27 μm , 2.27~3.8 μm , 3.8~8.3 μm and 8.3~20 μm) by this model. For verifying the rationality and reliability of the numerical simulation model, a test of the spectrum features of exhaust plume from the engine is conducted. The results suggest that there is strongest radiation of the liquid-engine exhaust plume in the band of 2.27~3.8 μm and maximum radiation area in the long-wave infrared band of 8.3~20 μm .

Key words: Physical properties; Radiation effect; Infrared absorption spectroscopy; Plume dynamics; Monte Carlo calculation

OCIS Codes: 260.3060; 260.2710; 300.1030

0 引言

飞行器发动机尾焰的红外辐射是红外探测设备对导弹、无人机等飞行器进行探测、识别、跟踪、告警的重要特征依据,也是发动机喷嘴等结构设计、燃料配方设计的重要参考.考虑到真实发动机试验昂贵、操作复杂等因素,数值仿真方法具有成本低、操作简单、结果具有可参考性等诸多优点,是发动机尾焰红外辐射特性研究的主要手段之一^[1-3].

近年来,以仿真或试验的方式对尾焰或类似火焰的红外辐射特性的研究有很多.2013年,刘尊洋等^[4-5]使

基金项目: 国家高技术研究发展计划(Nos.2007AA12Z101, 2009AA01Z225)资助

第一作者: 郑海晶(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为尾焰红外辐射特性. Email: zhjsea08@163.com

导师(通讯作者): 白廷柱(1955-),男,教授,博士,主要研究方向为微光、紫外、红外成像技术与系统. Email: tzhbai@bit.edu.cn

收稿日期: 2018-03-08; **录用日期:** 2018-05-30

<http://www.photon.ac.cn>

用 Fluent 软件计算了尾焰流场,分别使用窄带模型和米氏散射理论计算气体和氧化铝的辐射参数,使用有限体积法求解辐射传输方程,建立了火箭尾焰红外辐射特性模型.LIU F 等分析了红外隐身飞机多波段探测性能,发现同时使用 $2.86\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.17\sim 4.55\ \mu\text{m}$ 两个波段能显著提高探测设备的探测率、增大其探测距离^[6].2017 年,ZHOU Y 等发展了多尺度窄带关联 k 分布 (Multi-Scale Narrow Band Correlated-k distribution, MSNBCK) 模型,利用此模型建立了典型发动机尾焰红外辐射仿真模型^[7],其结果表明在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段都必须考虑壁面的红外辐射,且在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,气体的红外辐射占有非常重要的位置.BLUNCK L 等测量了某收缩喷管尾焰的窄带红外辐射强度^[1-3].RETIEF P 等利用短波红外相机 ($1.1\sim 2.5\ \mu\text{m}$)、中波红外相机 ($2.5\sim 7\ \mu\text{m}$)、长波红外相机 ($7\sim 15\ \mu\text{m}$) 以及一个覆盖短、中、长红外波段的红外辐射热计,测量了某型发动机尾焰的红外光谱辐射强度和红外图像^[8],其结果表明,中波波段是最好的观察波段.

大多数针对尾焰红外辐射特性的试验均在短波、中波、长波三个波段进行,而仿真计算只是在某个窄波段进行.实际上,由于尾焰中辐射介质在不同波段有不同的吸收特性,所以尾焰在不同红外波段的辐射特性也不尽相同,研究针对尾焰不同红外波段特性的仿真模型,对于红外告警预警系统设计和飞行器隐身技术的发展具有重要意义^[9].一般来说,尾焰红外辐射计算包含三个部分:1) 尾焰流场计算;2) 辐射特性参数计算;3) 辐射特性传输方程求解.本文基于蒙特卡洛法 (Monte Carlo Method, MCM) 法,建立了尾焰红外辐射特性仿真模型.用 Fluent 软件计算尾焰流场,考虑湍流、二次燃烧对流场的影响,得到流场温度分布、压力分布、组分分布等.利用 HITEMP-2010 数据库计算辐射特性参数,用逐线 (Line By Line, LBL) 法分别计算了 H_2 、 O 、 CO_2 、 CO 在 $1\sim 15\ \mu\text{m}$ 的吸收系数.用 MCM 解决辐射传输问题,得到尾焰红外光谱及辐亮度空间分布.为了验证仿真模型的精确度及有效性,进行了发动机尾焰红外辐射特性试验,并与仿真结果进行对比.

1 尾焰红外辐射仿真模型

1.1 辐射传输

早期多使用热流法求解辐射传输方程.由于热流法在有限个方向上计算辐射能量的空间传输,具有一定程度的物理失真.近年来使用较多的有离散坐标法 (Discrete Ordinates Method, DOM),有限体积法 (Finite Volume Method, FVM).DOM 和 FVM 对计算机要求较低,但存在假扩散和射线效应等问题.MCM 原理简单,对复杂区域和模型适应性较好,在尾焰红外辐射特性仿真计算方面应用广泛.虽然 MCM 比其他方法耗费更多的计算时间,但是避免了求解复杂的辐射传输方程,且在如今计算机性能不断提升的情况下,计算耗时也将越来越短.DOM、FVM 等都不同程度对辐射传输方程进行了简化,使得最终的结果并不是精确解.MCM 在光线数目达到一定量时,误差在可接受的范围内,可得到最精确的解^[10-11].

1.2 蒙特卡洛法

MCM 求解辐射传输的基本思想是:辐射传输过程可以看作是光子运动过程,其运动过程可分解为发射、吸收和散射等一系列独立的子过程,每一个子过程均为随机问题,可建立每个子过程的概率模型.从光子发射位置开始,追踪每个光子的轨迹及光子最终的归宿,最后统计光子数及辐射能量分布.MCM 流程如图 1 所示.三维流场中每个体积元都可以看做是一个微元体,微元体内部是均匀的,即微发射体内每个点是各向同性的.每个微发射体发射相同数量的光子,每个光子携带的能量是随机的,光子携带能量的随机过程由该单元体的物理参数决定,如温度、压力、组分、组分浓度等.

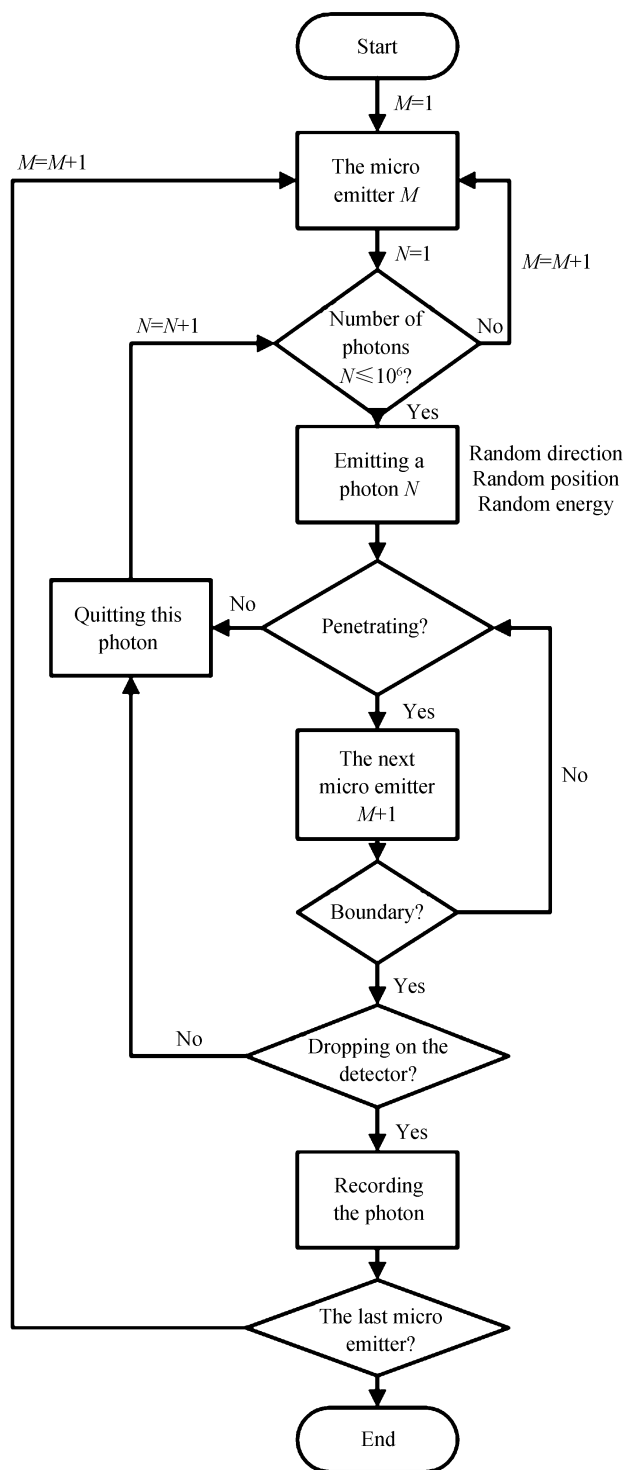


图1 MCM流程图

Fig.1 Flowchart of the MCM

1.2.1 网格预处理

MCM模型的基础是尾焰流场,如流场单元体温度、压力、组分浓度等.尾焰流场结果来自Fluent软件,从Fluent软件导出的文件中记录了流场中每个点的信息,包括坐标值、温度值、压力值、组分成份、各组分浓度等.然而,由于流场网格为非均匀网格,Fluent软件在网格中标记的序号并不适用于MCM,因此需对网格序号重新编制.重新编制的网格序号如图2所示.

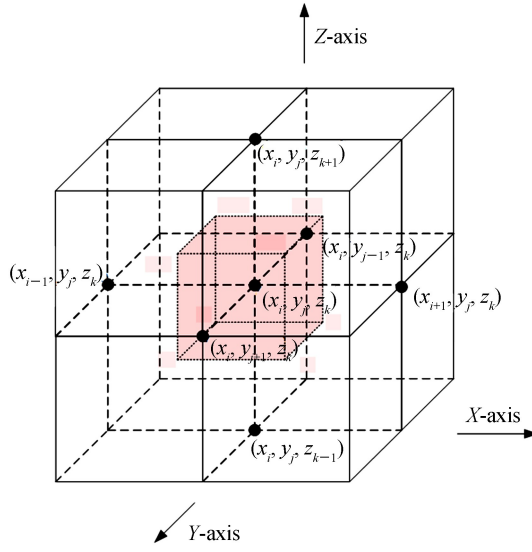


图2 重新编制的网格序号示意图

Fig.2 Diagram of the re-organised net order number

以点 (x_i, y_j, z_k) 为例,点 (x_i, y_j, z_k) 代表的微元体大小由该点与相邻点连线的中点决定,图中深色区域即为微元体.定义微元体的六个面分别为

$$\begin{cases} x_{i, \text{face}^-} = (x_{i-1} + x_i) / 2 \\ x_{i, \text{face}^+} = (x_i + x_{i+1}) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_{j, \text{face}^-} = (y_{j-1} + y_j) / 2 \\ y_{j, \text{face}^+} = (y_j + y_{j+1}) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} z_{k, \text{face}^-} = (z_{k-1} + z_k) / 2 \\ z_{k, \text{face}^+} = (z_k + z_{k+1}) / 2 \end{cases} \quad (3)$$

则微元体的长(x 轴方向)、宽(y 轴方向)、高(z 轴方向)为

$$L_{i,j,k} = \left| \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right| + \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right| \quad (4)$$

$$W_{i,j,k} = \left| \frac{y_j - y_{j-1}}{2} \right| + \left| \frac{y_{j+1} - y_j}{2} \right| \quad (5)$$

$$H_{i,j,k} = \left| \frac{z_k - z_{k-1}}{2} \right| + \left| \frac{z_{k+1} - z_k}{2} \right| \quad (6)$$

将微元体内部看作是各向同性的,即微元体内部各点的温度、压力、组分浓度等参数均与中心点 (x_i, y_j, z_k) 相同.

图3所示为尾焰网格方向,喷管出口平面中心点为坐标原点 $(0,0,0)$, y 轴正方向为尾焰喷射方向,则三维尾焰以 y 轴为中心轴对称.

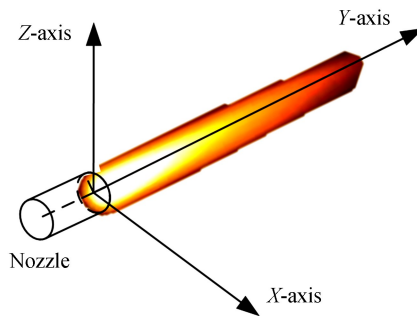


图3 尾焰网格方向示意图

Fig.3 Coordinate of the exhaust plume

1.2.2 微元体发射光子

1) 光子波长

MCM 处理微元体发射能量的随机过程有多种方式, 如随机化每个微元体发射的光子数, 或者直接随机化微元体发射的辐射强度, 其本质都是以温度、压力等流场参数为基础, 建立某个物理量的随机模型. 本文 MCM 模型中每个微元体发射的光子数相同, 随机化其光子波长.

对于红外波段, 随机化的光子波长与微元体温度有关, 反映了微元体辐射的能量. 将高温微元体看作黑体, 由普朗克定律可得光子波长的概率分布函数 (Probability Distribution Function, PDF) 为^[12]

$$f(\lambda) = (15/\pi^4 \lambda^5) (hc/kT)^4 / [\exp(hc/k\lambda T) - 1] \quad (7)$$

式中, λ 为光子波长, T 为微元体温度, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为真空中的光速.

令 $x = hc/k\lambda T$, 则光子波长的 PDF 为

$$f(x) = (15/\pi^4) x^3 / (e^x - 1) \quad (8)$$

抽样方法为

$$\begin{cases} n = \min\{n : 90U/\pi^4 \leq \sum_{i=1}^n 1/i^4\} \\ X = -\ln(U_1 U_2 U_3 U_4) / n \end{cases} \quad (9)$$

式中, U 为均匀分布, n 为满足条件的变量数.

2) 光子起始位置及发射方向

微元体 (x_i, y_j, z_k) 发出的光子, 其起始位置是随机的. 设光子的起始位置坐标为 (P_{i0}, P_{j0}, P_{k0}) , 则 P_{i0}, P_{j0}, P_{k0} 均服从均匀分布, 结合式(1)~(3)有

$$P_{i0} \sim U(x_{i, \text{face-}}, x_{i, \text{face+}}) \quad (10)$$

$$P_{j0} \sim U(y_{j, \text{face-}}, y_{j, \text{face+}}) \quad (11)$$

$$P_{k0} \sim U(z_{k, \text{face-}}, z_{k, \text{face+}}) \quad (12)$$

式中, $U(a, b)$ 表示最大值为 b 、最小值为 a 的均匀分布.

光子起始发射方向也是随机的. 设光子发射方向为 (θ, φ) , 满足

$$\cos\theta = -1 + 2\xi \quad (13)$$

$$\varphi = 2\pi\xi \quad (14)$$

式中, ξ 是随机变量, $\xi \sim U(0, 1)$.

发射方向 (θ, φ) 可用方向矢量表示, 即 (n_x, n_y, n_z)

$$n_x = \sin\theta \cos\varphi \quad (15)$$

$$n_y = \sin\theta \sin\varphi \quad (16)$$

$$n_z = \cos\theta \quad (17)$$

方向角 (θ, φ) 示意图见图 4.

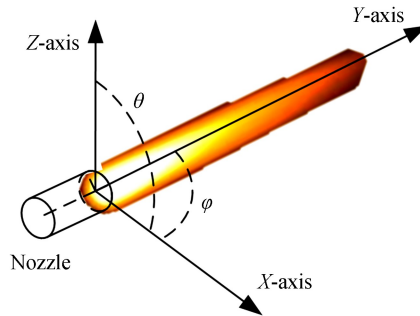


图 4 方位角和天顶角示意图
Fig.4 Azimuth angle and zenith angle

1.2.3 微元体内传播过程

光子在尾焰内部传播时, 遇到 H_2O 、 CO_2 等气体时会发生辐射吸收现象; 遇到颗粒物会发生散射现象. 如

若被吸收、散射的能量过大,光子将不能穿透微元体,否则光子将透射出微元体.

1) 微元体内传播距离

在某一微元体内,密度是常数,因此微元体在光子路径上的光学深度(Optical depth)为

$$\tau_{\text{cell}} = \rho_{\text{cell}} \kappa s \quad (18)$$

式中, ρ_{cell} 为微元体内摩尔密度 (mol/m^3); κ 为衰减系数 ($\text{cm}^2/\text{molecule}$), 是吸收和散射共同作用的结果; s 为光子在微元体中传播的距离, 即

$$\begin{cases} s = \min(s_x, s_y, s_z) \\ s_x = (x_{\text{face}} - x) / n_x \\ s_y = (y_{\text{face}} - y) / n_y \\ s_z = (z_{\text{face}} - z) / n_z \end{cases} \quad (19)$$

式中, (x, y, z) 是光子进入微元体时的位置, (n_x, n_y, n_z) 是光子的方向矢量, s_x, s_y, s_z 分别为假设光子与 $x_{\text{face}}, y_{\text{face}}, z_{\text{face}}$ 相交时行进的距离, 如图 5.

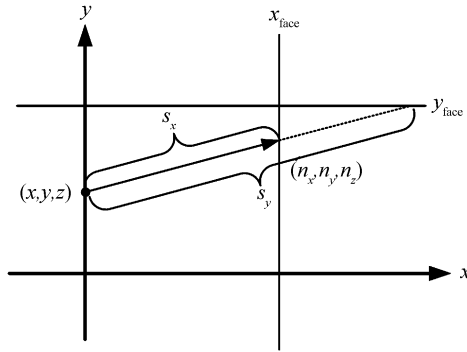


图 5 光子在微元体内传播示意图
Fig.5 Path of a photon in a micro-volume

2) 判断光子是否透射微元体

光子在尾焰内部传播时, 遇到 $\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2$ 等气体发生的辐射吸收和遇到颗粒物会发生的散射系数均可由 HITEMP-2010 数据库计算得到. 设随机变量 τ_0 为

$$\tau_0 = -\ln(1-U) \quad (20)$$

式中, U 为均匀分布.

结合式(18)和式(20), 判断光子能否透射微元体的方法为考虑式(21)是否成立.

$$\tau_{\text{cell}} > \tau_0 \quad (21)$$

如若式(21)成立, 则光子能透射微元体, 否则光子被单元体吸收.

3) 散射方向

光子在微元体内发生散射后, 其传播方向随即发生变化, 散射发生后的运动方向与散射极角和散射方位角有关. 光子散射为随机过程, 散射极角和散射方位角的 PDF 为

$$f(\theta_s, \varphi_s) = f(\theta_s) f(\varphi_s) = (3/8) (1 + \cos^2 \theta_s) \sin \theta_s \times (1/2\pi) \quad (22)$$

式中, θ_s 为散射极角, φ_s 为散射方位角.

4) 散射位置

微元体为均匀介质体, 光子在运动路径上发生散射, 且发生散射的位置不可知. 对此可根据式(18)、(20)及(21), 定义发生散射的位置与光子起始点的距离为

$$dl = \frac{\tau_0 - \tau_{\text{cell}}}{\rho_{\text{cell}} \kappa} \quad (23)$$

发生散射的位置位于光子运动方向上. 如光子在微元体中的起始点为 (x_0, y_0, z_0) , 运动方向为 (θ, φ) , 则发生散射的位置为 (x_s, y_s, z_s) 有

$$x_s = dl \sin \theta \cos \varphi + x_0 \quad (24)$$

$$y_s = dl \sin\theta \sin\varphi + y_0 \quad (25)$$

$$z_s = dl \cos\theta + z_0 \quad (26)$$

5) 散射后运动方向

光子在微元体中发生散射, 散射方向 (θ_s, φ_s) 表示粒子坐标系下的天顶角、圆周角. 此处的粒子坐标系以光子为原点, x, y, z 轴方向与全局坐标系一致. 设光子发生散射后在全局坐标系下的方向为 (θ^*, φ^*) , 满足

$$\cos\theta_s = \cos\theta^* \cos\theta + \sin\theta^* \sin\theta \cos(\varphi^* - \varphi) \quad (27)$$

$$\cos\theta^* = \cos\theta_s \cos\theta + \sin\theta_s \sin\theta \cos\varphi_s \quad (28)$$

1.2.4 下一个微元体

光子透射某个微元体 (x_i, y_j, z_k) 后, 会入射到相邻的微元体内. 设光子离开该微元体时的坐标 $(x_{i,out}, y_{i,out}, z_{i,out})$, 方向向量 (n_x, n_y, n_z) . 则光子进入相邻微元体有三种情况.

第一种情况是光子入射在某个面上, 如 $x_{i,out} = x_{i,face+}$, 表示光子在 $x_{i,face+}$ 上, 此时 $n_x \geq 0$, 则光子入射到微元体 (x_{i+1}, y_j, z_k) 内, 如果 $x_{i,out} = x_{i,face-}$, 则光子入射到微元体 (x_{i-1}, y_j, z_k) 内. 列举如表 1 所示.

表 1 光子入射在某个面上的情况列举

Table 1 Enumeration of the possible states when the photon arrives on a surface

Photon incident surface	The next micro emitter
$x_{i,out} = x_{i,face+}$	(x_{i+1}, y_j, z_k)
$x_{i,out} = x_{i,face-}$	(x_{i-1}, y_j, z_k)
$y_{j,out} = y_{j,face+}$	(x_i, y_{j+1}, z_k)
$y_{j,out} = y_{j,face-}$	(x_i, y_{j-1}, z_k)
$z_{k,out} = z_{k,face+}$	(x_i, y_j, z_{k+1})
$z_{k,out} = z_{k,face-}$	(x_i, y_j, z_{k-1})

第二种情况是光子在两个面的交线上, 如 $x_{i,out} = x_{i,face+}$ 且 $y_{j,out} = y_{j,face+}$, 则光子入射到微元体 (x_{i+1}, y_{j+1}, z_k) 内. 列举如表 2 所示.

表 2 光子入射在某交线上的情况列举

Table 2 Enumeration of the possible states when the photon arrives on an intersecting line

Photon incident intersecting line	The next micro emitter
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face+}$	(x_{i+1}, y_{j+1}, z_k)
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face-}$	(x_{i+1}, y_{j-1}, z_k)
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face+}$	(x_{i-1}, y_{j+1}, z_k)
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face-}$	(x_{i-1}, y_{j-1}, z_k)
$y_{j,out} = y_{j,face+} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	(x_i, y_{j+1}, z_{k+1})
$y_{j,out} = y_{j,face+} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	(x_i, y_{j+1}, z_{k-1})
$y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	(x_i, y_{j-1}, z_{k+1})
$y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	(x_i, y_{j-1}, z_{k-1})
$z_{k,out} = z_{k,face+} \& x_{i,out} = x_{i,face+}$	(x_{i+1}, y_j, z_{k+1})
$z_{k,out} = z_{k,face+} \& x_{i,out} = x_{i,face-}$	(x_{i+1}, y_j, z_{k-1})
$z_{k,out} = z_{k,face-} \& x_{i,out} = x_{i,face+}$	(x_{i-1}, y_j, z_{k+1})
$z_{k,out} = z_{k,face-} \& x_{i,out} = x_{i,face-}$	(x_{i-1}, y_j, z_{k-1})

第三种情况是光子在三个面交点上, 如 $x_{i,out} = x_{i,face+}$ 、 $y_{j,out} = y_{j,face+}$ 且 $z_{k,out} = z_{k,face+}$, 则光子入射到微元体 $(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k+1})$ 内. 列举如表 3 所示.

表 3 光子入射在某交点上的情况列举

Photon incident intersecting point	The next micro emitter
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face+} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	$(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k+1})$
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	$(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k-1})$
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	$(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k+1})$
$x_{i,out} = x_{i,face+} \& y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	$(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k-1})$
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face+} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	$(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k+1})$
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face+} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	$(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k-1})$
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face+}$	$(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k+1})$
$x_{i,out} = x_{i,face-} \& y_{j,out} = y_{j,face-} \& z_{k,out} = z_{k,face-}$	$(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k-1})$

1.2.5 光子统计

设定成像系统水平半视场角为 ω_H 、垂直半视场角为 ω_V ，物距为 L ，成像系统中心位于 x 轴上（对尾焰成 90° 视场），则成像面所在平面为 $x_{plane} = L$ ，成像面范围为

$$y^- = -L \sin\omega_H \quad (29)$$

$$y^+ = L \sin\omega_H \quad (30)$$

$$z^- = -L \sin\omega_V \quad (31)$$

$$z^+ = L \sin\omega_V \quad (32)$$

若光子离开尾焰区域时位置坐标为 $(x_{i,out}, y_{j,out}, z_{i,out})$ ，方向向量为 (θ, φ) ，之后继续沿直线传播到 $x_{plane} = L$ 平面上，最后需判断光子是否落在成像面上。

首先求得光子离开尾焰区域后的传播距离为

$$L = l_{last} \sin\theta \cos\varphi + x_{i,out} \quad (33)$$

然后求得 y_{last} 、 z_{last} 分别为

$$y_{last} = l_{last} \sin\theta \sin\varphi + y_{j,out} \quad (34)$$

$$z_{last} = l_{last} \cos\theta + z_{k,out} \quad (35)$$

光子是否落在成像面上，由式(36)和(37)可判断。

$$y^- \leq y_{last} \leq y^+ \quad (36)$$

$$z^- \leq z_{last} \leq z^+ \quad (37)$$

如果式(36)和(37)同时成立，则记录此光子。

1.3 仿真计算误差

计算精度是评估仿真方法的重要指标，而辐射强度空间分布决定了 MCM 的计算精度。为了量化 MCM 的计算精度，定义误差函数为^[13]

$$e(s) = \left| \frac{v(s) - v_{ref}(s)}{v_{ref}(s)} \right| \times 100\% \quad (38)$$

式中， s 为某点到喷嘴出口的距离， $v(s)$ 为仿真值， $v_{ref}(s)$ 为试验值。本文只计算对称轴上点的误差函数值，对称轴上所有点误差的平均值为平均误差 \bar{e} 。

1.4 光子数

每个微发射体发出的光子数量对统计结果有很大的影响。一般来说，光子数量越多，误差越小，但同时光子数的增加会引起计算效率的降低。图 6 为本文 MCM 方法中平均误差随光子数变化情况，可以看出，平均误差随光子数增多而降低。光子数从 10^5 个增加到 10^7 个时，平均误差从 95% 骤降至 15%，光子数大于 10^7 个时，平均误差缓慢降低。因此，从精确度和计算效率两方面折衷考虑，本文 MCM 中每个微发射体发出的光子数量取 10^7 个。

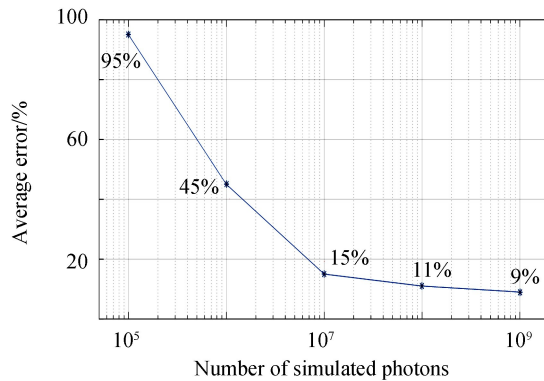


图6 平均误差随光子数变化曲线
Fig.6 Average error versus photon number

2 尾焰红外辐射测量试验

为了验证仿真模型的有效性,进行了某型发动机尾焰红外辐射测量试验.被测发动机为某型无人机装置的涡喷发动机,燃料为航空煤油,喷嘴出口尺寸为72.1 mm,进口尺寸为96.5 mm.喷嘴外壁放置热变电阻,用以测量温度,如图7.

试验中使用MR170便携式红外光谱辐射计来测量尾焰光谱,辐射计光谱范围为 $740\sim 5\,000\text{ cm}^{-1}$ ($2\sim 13.5\ \mu\text{m}$).试验中使用的长波热像仪、中波热像仪、短波热像仪的波段分别为 $7.7\sim 9.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.0\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$.热像仪在进行测量之前均进行了黑体标定^[14].表4为试验所用仪器的型号及参数.

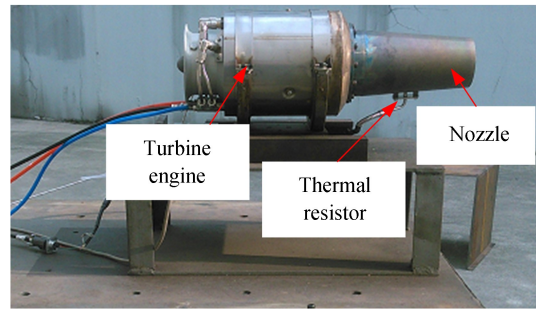


图7 涡轮发动机
Fig.7 Turbine engine

表4 试验所用仪器设备
Table 4 Instruments

Instrument	Model	Wavelength range
Infrared spectral radiometer	MR170	$2\sim 13.5\ \mu\text{m}$
LWIR camera	FLIR SC7300L	$7.7\sim 9.3\ \mu\text{m}$
MWIR camera	FLIR SC7300M	$3.0\sim 4.8\ \mu\text{m}$
SWIR camera	Xenics Bobcat-640	$0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$

试验场地安排如图8所示.红外光谱辐射计距离发动机50 m,以使其视角能覆盖整个尾焰,红外光谱辐射计与尾焰在同一水平高度.为了尽量消除背景辐射的影响,在发动机后放置黑色幕布.

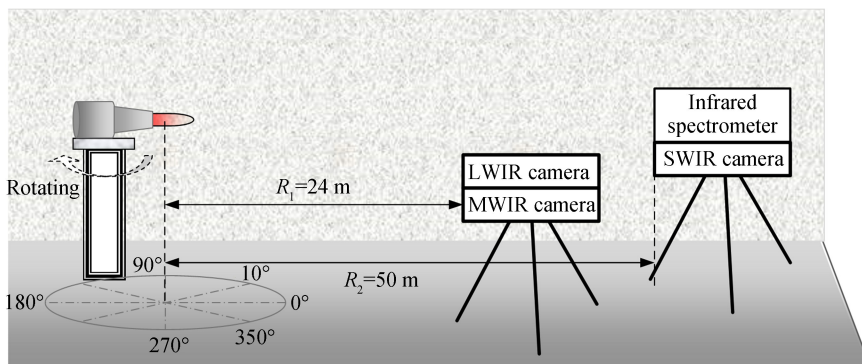


图8 试验场地安排
Fig.8 Experiment layout

3 结果与讨论

尾焰中 H_2O 和 CO_2 组分占绝大多数,对尾焰红外辐射特性影响较大,从HITRAN和HITEMP-2010

数据库得到的 H_2O 和 CO_2 谱吸收系数可知, H_2O 的吸收谱中心波长位置主要有 $1.38 \mu m$ 、 $1.87 \mu m$ 、 $2.7 \mu m$ 、 $6.3 \mu m$ 和 $18 \mu m$, CO_2 的吸收峰中心波长位置主要有 $2.7 \mu m$ 、 $4.3 \mu m$ 和 $15 \mu m$ ^[15-17]. 根据 H_2O 和 CO_2 的吸收特性可将红外波段划分为 5 个谱带^[18], 如表 5 所示. 尾焰红外模拟仿真将分别在这 5 个波段进行.

表 5 谱带划分
Table 5 Spectra division

Division number	Bands/ μm	Bands/ cm^{-1}
1	8.3~20	500~1 200
2	3.8~8.3	1 200~2 600
3	2.27~3.8	2 600~4 400
4	1.69~2.27	4 400~5 900
5	1.32~1.56	6 400~7 600

3.1 模拟仿真结果

3.1.1 网格划分

图 9 为喷管及尾焰计算区域. 仿真模型中的喷管为收缩型喷管, 如第 2 节所述, 入口直径为 72.1 mm , 进口尺寸 96.5 mm . 由于重力影响较小, 因此将整个仿真区域设置为二维轴对称区域, 其大小为 $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$. 网格划分如图 10 所示. 网格为四边形结构化网格, 大小为 100×100 个, 总量为 11 万个, 靠近中心轴的网格进行了加密处理.

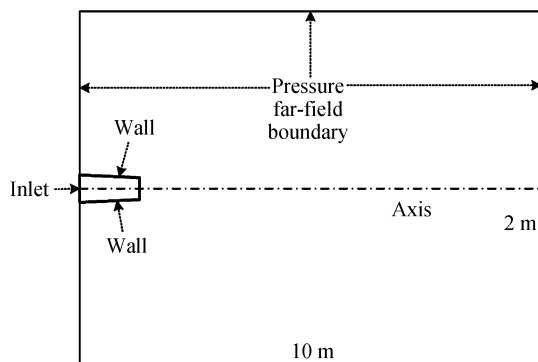


图 9 尾焰计算区域

Fig.9 Calculation area of the exhaust plume simulation

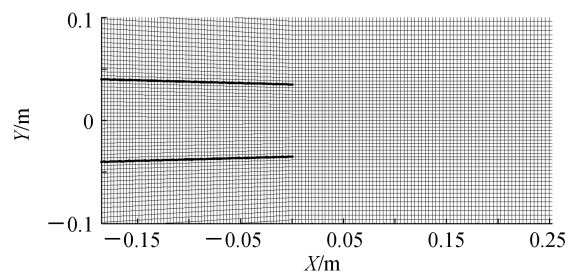


图 10 喷嘴附近网格划分

Fig.10 Net near the nozzle

3.1.2 尾焰流场温度分布

使用 Fluent 软件计算尾焰流场参数, 其中 RNG k- ϵ 模型用来模拟湍流对流场的影响^[19], CHEMKIN 软件中理想搅拌反应器 (Perfectly Stirred Reactor, PSR) 用来计算二次燃烧过程中的化学反应^[20], 得到尾焰流场温度分布如图 11 所示.

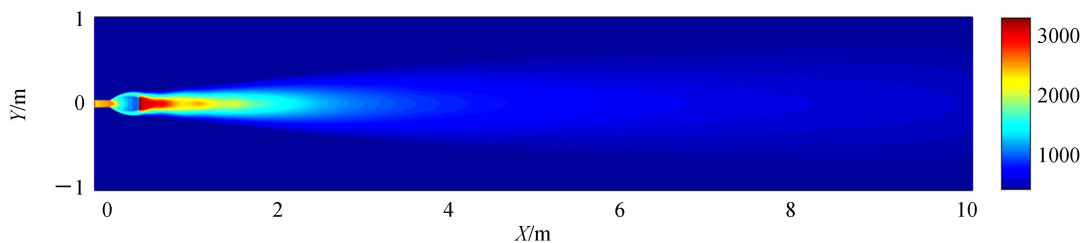


图 11 尾焰流场温度分布

Fig.11 Temperature distribution of the exhaust plume

3.1.3 尾焰红外辐射分布

使用本文 MCM 模型, 对试验发动机尾焰红外辐射特性进行仿真, 得到尾焰在 5 个红外波段的辐射强度空间分布, 如图 12 所示.

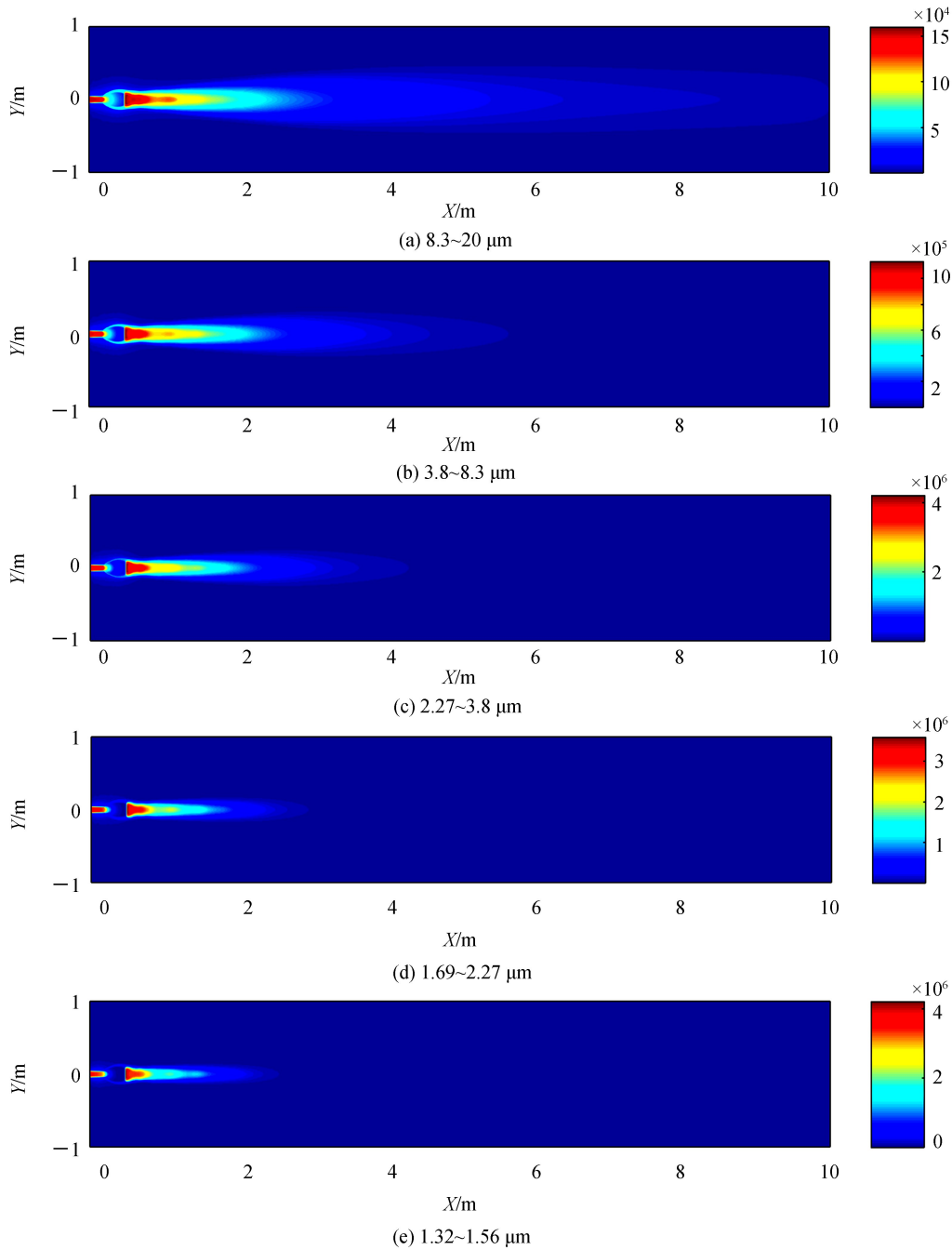


图 12 尾焰红外辐射强度空间分布

Fig.12 Infrared intensity spatial distribution of the exhaust plume

由图 12 可以看出,尾焰在各个红外波段均有比较显著的马赫盘,在 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 长波波段有最大辐射面积,而在 $2.27\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 有最强辐射值.为了便于分析各个波段的辐射变化情况,将尾焰中心轴上辐射值绘制成变化曲线,如图 13 所示,可以看出不同波段内辐射强度的变化情况,以及不同波段之间辐射强度的对比.

图 13 中,每个波段的辐射强度值在横坐标为 4 m 处均基本为 0,说明尾焰长度为 4 m.每个波段的红外辐射在 0.3 m 处均有最大值,结合图 12 说明每个波段的辐射强度均在第一个马赫盘处有最大值.在 0.3~4 m 之间,辐射强度值有一定起伏变化,结合图 12 中第二个、第三个马赫盘位置,说明马赫盘处温度、组分等流场参数的变化均会引起辐射强度的变化.图中, $2.27\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 波段的辐射值最大,此波段最大值达到 $2.7\times 10^6\ \text{W}/\text{m}^2$, $8.30\sim 20\ \mu\text{m}$ 波段的辐射值最小.

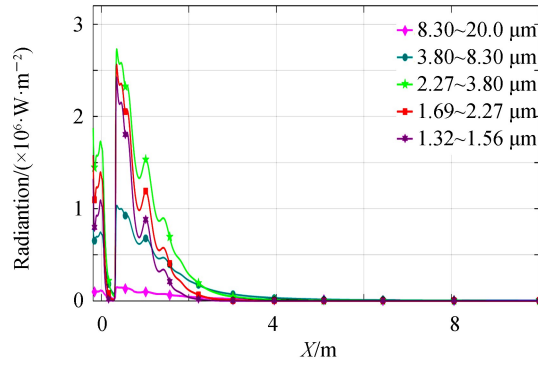


图 13 尾焰中心轴红外辐射分布曲线

Fig.13 Infrared radiation distribution of the exhaust plume on the axis

3.2 试验结果

图 14 为试验中获取的发动机尾焰长波、中波、短波图像,其中中波波段尾焰相对清晰,长波和短波均受到背景辐射影响强烈.图像中的框线部分表示尾焰区域.

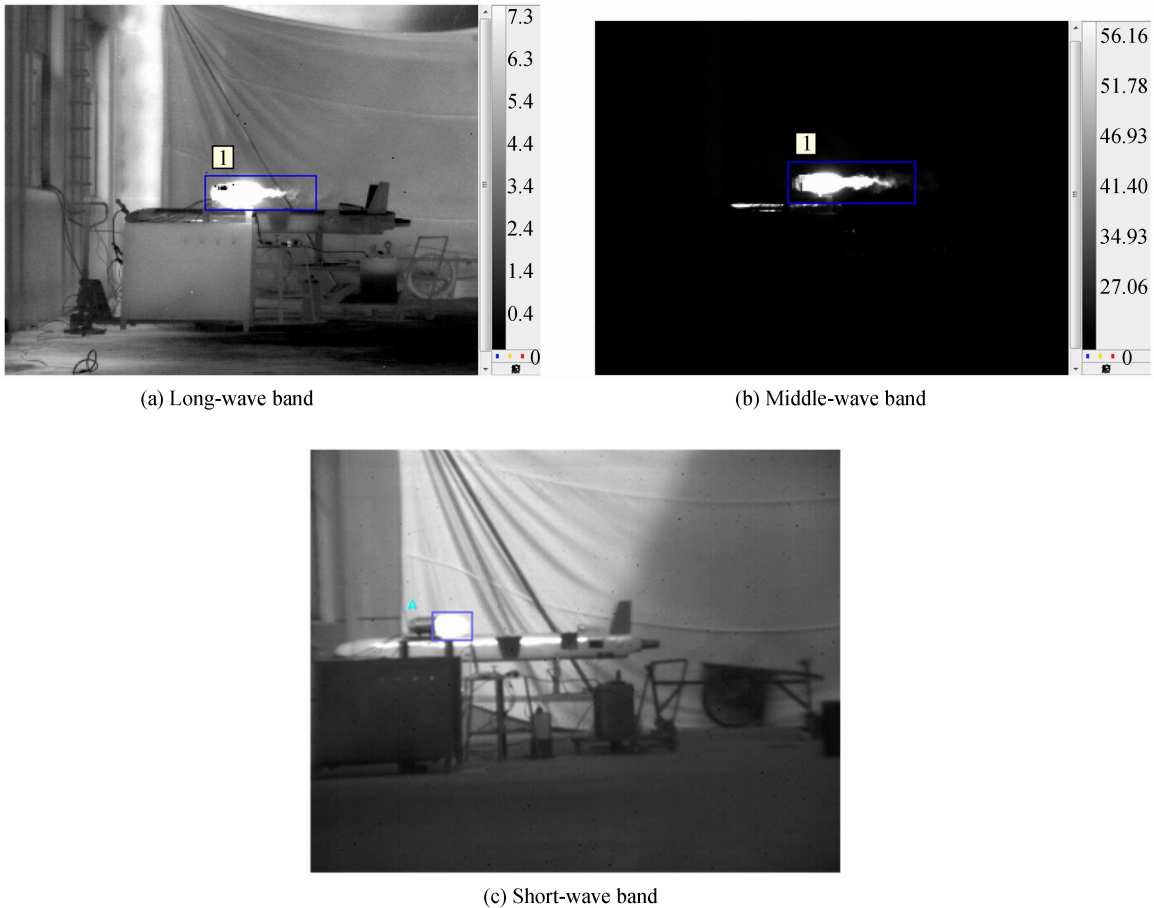


图 14 尾焰图像

Fig.14 Image of the exhaust plume

通过尾焰红外图像,得到不同红外波段的尾焰辐射面积.图 14(a)中框线部分表示尾焰区域,有

$$\begin{cases} h = eLN_h / f' \\ w = eLN_w / f' \end{cases} \quad (39)$$

式中, h 表示目标高度, w 表示目标宽度, e 是热像仪像元尺寸大小, L 是目标到相机距离, f' 是焦距, N_h 是框线宽度对应的像素数, N_w 是框线高度对应的像素数.那么,辐射面积为 $h \times w$.

图 15 为试验结果的辐射面积与仿真结果对比.

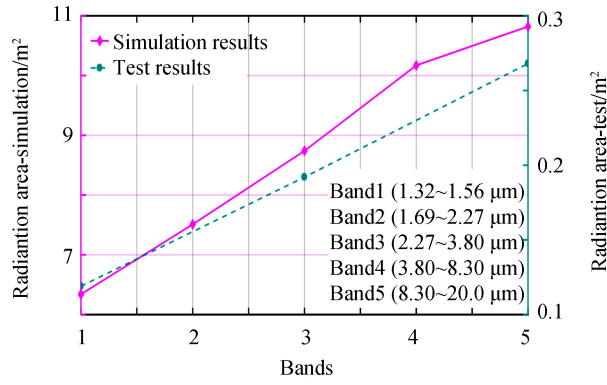


图 15 试验结果与仿真结果的辐射面积对比

Fig.15 Radiation area comparison between the test results and simulated results

图 16 为用红外光谱仪采集的发动机尾焰光谱辐射强度分布。

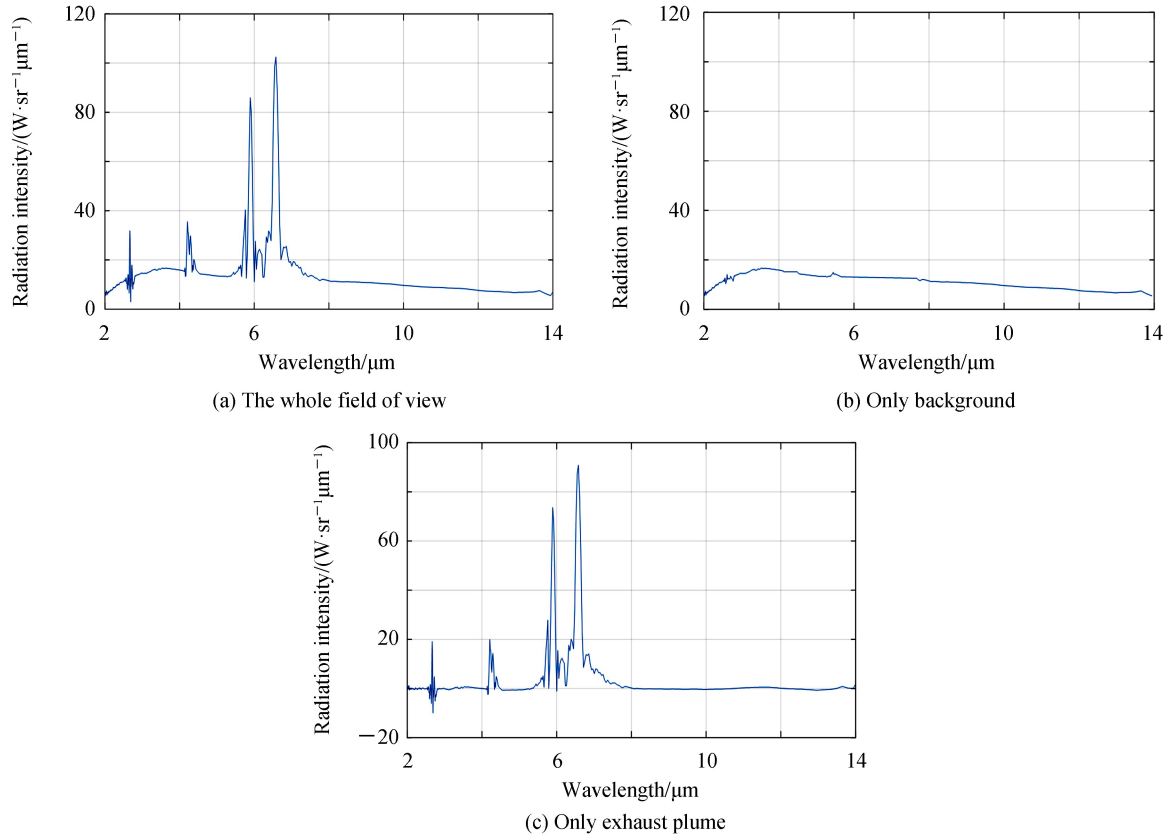


图 16 尾焰光谱辐射强度

Fig.16 Spectral radiation intensity of the exhaust plume

图 16(a) 对应图 14 中的整个视场, 包括尾焰、喷嘴、背景及视场中其他辐射源的光谱辐射强度分布, 图 16(b) 为背景光谱辐射强度, 图 16(c) 为去除背景辐射后的发动机尾焰光谱辐射强度分布。

通过尾焰红外光谱辐射强度, 可得尾焰的红外辐射强度, 计算公式为

$$I_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda \quad (40)$$

式中, 下标 $\Delta\lambda$ 表示波段, λ_1 和 λ_2 分别为波段的最大值和最小值, I 表示辐射强度。

图 17 为试验结果的辐射强度与仿真结果对比。

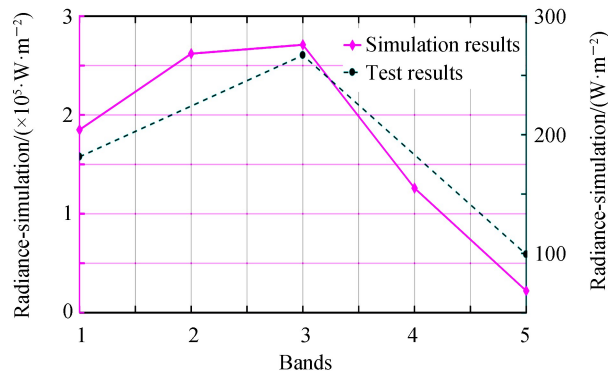


图 17 试验结果与仿真结果的辐射强度对比

Fig.17 Radiation intensity comparison between the test results and simulated results

图 15 和图 17 表明试验结果与仿真结果具有一致性.图 15 中,试验结果与仿真结果均说明尾焰在长波段($8.30\sim 20 \mu\text{m}$)辐射面积最大,短波波段辐射面积最小.图 17 中,试验结果与仿真结果的曲线基本重合,尾焰在中波波段辐射强度最大,长波辐射强度最小.

4 结论

本文基于蒙特卡洛法建立了尾焰红外辐射特性仿真模型.使用 Fluent 软件计算尾焰流场,使用 HITRAN/HITEMP 数据库利用 LBL 法计算辐射参数,使用蒙特卡洛法解决辐射传输问题,最终求得尾焰红外辐射强度空间分布.与此同时,设计了相关试验对仿真模型进行了验证.试验研究结果和仿真结果的一致性说明了仿真模型的可靠性与准确性.建立的液体发动机尾焰红外辐射模型可以较为真实地反映液体发动机尾焰的红外辐射特性,在仿真结果中得到的尾焰辐射规律具有一定的可信度.结果显示了该型发动机尾焰红外辐射特性:1)尾焰红外辐射强度最强在 $2.27\sim 3.8 \mu\text{m}$ 波段;2)长波波段尾焰具有最大辐射面积.该仿真模型及试验结果对发动机设计、燃料配比设计以及无人机隐身技术具有参考意义,对于红外告警技术的发展也具有一定的借鉴意义.

参考文献

- [1] BLUNCK L, HARVAZINSKI E, RANKIN A, *et al.* Turbulent radiation statistics of exhaust plumes exiting from a subsonic axisymmetric nozzle[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, **26**(2): 286-293.
- [2] BLUNCK L, HARVAZINSKI E, MERKLE L, *et al.* Influence of turbulent fluctuations on the radiation intensity emitted from exhaust plumes[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, **26**(4): 581-589.
- [3] BLUNCK L, GORE P. Study of narrowband radiation intensity measurements from subsonic exhaust plume[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, **27**(1): 227-235.
- [4] LIU Zun-yang, SHAO Li, WANG Ya-fu, *et al.* Influence of afterburning on the infrared radiation of solid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(6): 0604001.
刘尊洋,邵立,汪亚夫等.复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, **33**(6): 0604001.
- [5] LIU Zun-yang, SHAO Li, WANG Ya-fu, SUN Xiao-quan. Influence of afterburning on infrared radiation of liquid rocket exhaust plume[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 480-485.
刘尊洋,邵立,汪亚夫等.复燃对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 480-485.
- [6] LIU Fei, SHAO Xiao-peng, HAN Ping-li, *et al.* Detection of infrared stealth aircraft through their multispectral signatures[J]. *Optical Engineering*, **53**(9): 094101.
- [7] ZHOU Yue, WANG Qiang, LI Ying. A new model to simulate infrared radiation from an aircraft exhaust system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, **30**(2): 651-662.
- [8] RETIEF P, DREYER M, BRINK C. Infrared recordings for characterizing an aircraft plume[C]. SPIE, 2017, **9257**, 92570C.
- [9] 王伟臣. 固体火箭发动机排气羽流红外特性研究[D]. 北京:北京理工大学, 2010.
- [10] GUO Ai-yan, TANG Yi, BAI Ting-zhu, *et al.* Modeling and measurement of UV radiation from hydrogen oxygen rocket motor plume[J]. *Laser and Infrared*, 2011, **41**(11): 1222-1225.
国爱燕,唐义,白廷柱等.氢氧火箭发动机羽流紫外辐射建模与测量[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(11): 1222-1225.
- [11] WANG Da-rui, LIANG Wei, MA Li-na, *et al.* Simulation on liquid rocket engine gas infrared characteristic based on

- finite volume method[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2017, **354**(4): 39-42.
- [12] 康崇祿. 蒙特卡罗方法理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] JIANG Xu, DENG Yong, LUO Zhao-yang, *et al.* Evaluation of path-history-based fluorescence Monte Carlo method for photon migration in heterogeneous media[J]. *Optical Express*, 2014, **22**(26): 31948-31965.
- [14] ZHENG Hai-jing, BAI Ting-zhu, WANG Quan-xi, *et al.* Experimental study of multispectral characteristics of an unmanned aerial vehicle at different observation angles[J]. *Sensors*, 2018, **18**(2): 428.
- [15] ROTHMAN S, GORDON E, BARBER J, *et al.* HITEMP the high temperature molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, **111**: 2139-2150.
- [16] ALBERTI M, WEBER R, MANCINI M, *et al.* Comparison of models for predicting band emissivity of carbon dioxide and water vapour at high temperatures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **64**: 910-925.
- [17] ALBERTI M, WEBER R, MANCINI M, *et al.* Validation of HITEMP 2010 for carbon dioxide and water vapor at high temperatures and atmospheric pressures in 450-7600 cm^{-1} spectral range[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, **157**: 14-33.
- [18] ZHENG Hai-jing, BAI Ting-zhu, WANG Quan-xi, *et al.* Infrared radiation characteristics of high temperature H_2O and CO_2 gas mixture jet flows[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(7): 0726001.
郑海晶, 白廷柱, 王全喜等. H_2O 和 CO_2 高温混合气体喷流红外辐射特性[J]. 光学学报, 2017, **37**(7): 0726001.
- [19] DHARAVATH M, CHAKRABORTY D. Numerical simulation of supersonic jet impingement on inclined plate[J]. *Defense Science Journal*, 2013, **63**(4): 355-362.
- [20] XIE Zheng, XIE Jian, CHANG Zheng-yang, *et al.* Numerical research on jet secondary combustion of rocket launch[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, **38**(5): 542-549.
谢政, 谢建, 常正阳, 等. 火箭发射燃气流二次燃烧数值研究[J]. 宇航学报, 2017, **38**(5): 542-549.

Foundation item: National High-tech Research and Development Program (Nos.2007AA12Z101, 2009AA01Z225)

引用格式: ZHENG Hai-jing, BAI Ting-zhu, WANG Quan-xi. Numerical Simulation and Experiment on Infrared Features of Exhaust Plume Based on Monte Carlo Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0826001
郑海晶, 白廷柱, 王全喜. 基于蒙特卡洛法的尾焰红外辐射特性仿真与试验[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0826001