

宽带 k 分布模型计算液体火箭尾焰辐射信号

尹雪梅, 王磊, 张雪龄, 吴超

(郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 快速计算火箭尾焰辐射信号对导弹的识别和跟踪具有重要意义。先利用工程经验公式计算得到尾焰的流场, 采用宽带 k 分布模型计算液体火箭尾焰的辐射信号, 并与逐线计算基准解比较, 发现宽带 k 分布模型在探测器工作光谱区域内的相对计算误差基本都小于 10%。利用该模型研究飞行参数对尾焰辐射信号的影响, 计算结果表明: 喷管出口温度、马赫数、非计算度增大, 液体火箭尾焰的辐射强度增大; 海拔高度升高, 不同探测器工作光谱区域尾焰辐射强度变化趋势有所不同。

关键词: 宽带 k 分布模型; 液体火箭尾焰; 辐射信号

中图分类号: TN211 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.11.011

Wide band k -distribution model for calculating radiation signal of liquid rocket exhaust plume

YIN Xue-mei, WANG Lei, ZHANG Xue-ling, WU Chao

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Quick calculation of rocket exhaust plume radiation signal is of great significance for missile identification and tracking. Firstly, the flow field of liquid rocket exhaust is calculated by engineering empirical formula, and the radiation signal of liquid rocket exhaust plume is calculated by wide band k -distribution model. Secondly, compared with the line-by-line reference solution, it is found that the relative calculation error of wide band k -distribution model in the working spectrum region of the detector is basically less than 10%. At last, the model is used to study the influence of flight parameters on the radiation signal of exhaust plume. The results show that the radiation intensity of liquid rocket exhaust plume increases with the increase of nozzle exit temperature, Mach number and non-calculating degree, and the variation trend of the radiation intensity of exhaust plume varies with the increase of altitude.

Keywords: wide band k -distribution model; liquid rocket exhaust plume; radiation signal

1 引言

在军事和航天领域分析飞行器尾喷焰辐射信号具有重要意义, 在过去几十年中受到学者们的广泛关注^[1-8]。分析火箭尾焰辐射信号所使用的最准确

的辐射特性计算模型是基于精确光谱数据库的逐线法(LBL)^[9-11]。但因 LBL 计算需要大量的计算资源和计算时间, 所以 LBL 仅作为基准用来判断其他模型的计算精度的标准。统计窄带模型(SNB)和窄

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51706209, No. 51604245); 河南省科技攻关项目(No. 192102210213); 河南省高校青年骨干教师培养计划(No. 2017 GGJS094)资助。

作者简介: 尹雪梅(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事高温气体辐射换热方面的研究。E-mail: yinxuemeihit@126.com

收稿日期: 2020-01-10

带 k 分布模型常用来计算火箭尾焰辐射信号^[12-14], 然而由于 SNB 模型的计算公式是基于气体投射率而不是吸收系数, 很难用于多维介质的计算。同时, 当应用于非等温和/或非均匀介质时, SNB 模型需要进一步的近似, 例如 Curtis - Godson 近似, 这可能导致更大的误差。窄带 k 分布模型虽然采用了吸收系数计算辐射传递, 但其仍需较多的计算时间, 不太适合火箭尾焰的探测和追踪。

由于火箭尾焰流场的复杂和气体光谱剧烈变化, 火箭尾焰辐射信号计算仍然是一个具有挑战性的课题。考虑到计算时间和计算精度, 宽带模型是火箭尾焰辐射信号计算较好的选择。尹雪梅等^[15]研究发现, 宽带 k 分布模型在计算火箭尾焰红外、可见谱段的远程探测辐射强度时, 在保证计算精度的前提下能大大减少计算时间; 李雨轩等^[16]在宽带 k 分布模型的基础上建立了多尺度多线组宽带 k 分布模型 (MSMGWB) 又大大地提升了计算精度和兼容性。本文采用工程实践中常用的简单经验公式求解火箭尾喷焰流场, 以 LBL 计算的火箭尾喷焰红外辐射信号结果为基准, 检验宽带 k 分布模型用于液体火箭尾喷焰辐射计算时的精度。最后分析了飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射信号的影响。

2 理论分析

k 分布法是将剧烈变化的光谱吸收系数根据数值大小排列成光滑单调递增函数, 将辐射计算中对波数的积分转化为累积分布函数的积分, 只需几个积分点便可获得辐射强度, 能大大缩短计算时间。

在宽谱带区间内, 计算吸收系数 k 的几率分布函数 $f(T, k)$ 时采用普朗克函数加权

$$f(T, k) = \frac{1}{I_{b\Delta\eta}} \int_{\Delta\eta} I_{b\eta}(T) \delta(k - \kappa_\eta) d\eta \quad (1)$$

式中, $I_{b\Delta\eta}$ 为谱带区间内总的黑体强度; $I_{b\eta}$ 为光谱黑体强度。累积 k 分布函数 $g(T, k)$ 为:

$$g(T, k) = \frac{1}{I_{b\Delta\eta}} \int_0^k \int_{\Delta\eta} I_{b\eta}(T) \delta(k - \kappa_\eta) d\eta dk \quad (2)$$

气体光谱辐射传递方程为:

$$\frac{dI_\eta}{ds} = \kappa_\eta I_{b\eta} - \kappa_\eta I_\eta \quad (3)$$

式(3)中, 两边乘 $\delta(k - \kappa_\eta)$, 再对宽谱带积分, 并除 $f(T, k)$ 得:

$$\frac{dI_g}{ds} = k(I_{b\Delta\eta} - I_g) \quad (4)$$

式中:

$$I_g = \int_{\Delta\eta} I_\eta \delta(k - \kappa_\eta) d\eta / f(T, k) \quad (5)$$

宽谱带总辐射强度为:

$$I = \int_{\Delta\eta} I_\eta d\eta = \int_0^1 I_g dg \quad (6)$$

采用 12 点 Gauss - Lobatto 积分方法来计算式(6)得:

$$I = \sum_{i=1}^N w_i I_{g_i} \quad (7)$$

式中, N 是积分点数; w_i 是求积的权。

将整个计算的光谱区间分成 10 个不重叠的宽谱带, 利用 HITEMP 数据库中气体谱线参数, 假设吸收系数与气体分压成正比, 根据计算得到的 Gauss 积分点对应的吸收系数曲线, 吸收系数采用温度的 6 次多项式拟合, 具体数值见文献[17]。假设混合气体重叠谱带各气体的吸收系数是统计非关联的, 则 H_2O 和 CO_2 的 k 分布吸收系数相加即可得到混合气体的 k 分布吸收系数。

假设红外探测器与火箭尾焰间距离很远, 则穿过尾喷焰的探测线相互平行。用 θ 表示探测方向与飞行方向的相反方向之间的夹角。则火箭尾焰辐射强度 I^* 为:

$$I^* = \sum (I_i + I_{i+1}) \times \Delta x / 2 \quad (8)$$

其中, I_i 是第 i 条探测线的辐射强度; Δx 是探测线间的步长。以逐线计算结果作为基准解, 则宽带 k 分布模型的误差为:

$$\text{error} = \frac{|I_{\text{WBK}}^* - I_{\text{LBL}}^*|}{I_{\text{LBL}}^*} \times 100 \% \quad (9)$$

3 计算结果与分析

3.1 宽带 k 分布模型与逐线计算比较

火箭尾喷焰流动一般是高度欠膨胀的超音速流, 本文采用工程实践中常用的简单经验公式求解流场^[18]。这些工程公式是从实践和实验中推导出来的, 可以保证足够的精度。

如果燃烧充分, 喷嘴出口气体仅由 CO_2 和 H_2O 组成。某液体火箭发动机的参数假定如下^[19]: 喷口截面半径 $r_e = 0.225$ m, 尾喷焰气体: 气体常数 $R = 352.8$ J/(kg · K), 比热比 $\gamma = 1.25$, 定压比热 $c_p = 1764$ J/(kg · K); 喷口燃气压力 $p_e = 2 \times 10^5$ Pa, 喷

口燃气温度 $T_e = 1050\text{ K}$, 喷口燃气速度 $u_e = 2040\text{ m/s}$, 即喷口燃气马赫数 $Ma_e = 3.0$; 尾喷焰周围空气: 压力 $p_a = 10^5\text{ Pa}$, 温度 $T_a = 288\text{ K}$, 密度 $\rho_a = 1.25\text{ kg/m}^3$, 定压比热 $c_{pa} = 1008\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。液体火箭尾焰气体 CO_2 和 H_2O 摩尔分数分别为 0.207 和 0.793, 在计算过程中空气和尾焰气体的特性参数保持不变。

实际探测工程中利用对多个探测器所捕获的辐射信号相对值来识别目标。军用卫星常用的探测器工作区间有 $10.0 \sim 13.4\ \mu\text{m}$ 、 $8.0 \sim 11.5\ \mu\text{m}$ 和 $4.3 \sim 5.15\ \mu\text{m}$ ^[20], 本文对液体火箭发动机尾焰在两个大气窗区 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 14\ \mu\text{m}$ 谱带^[21-22] 和探测器工作区间的辐射信号进行了计算。

液体火箭尾焰辐射强度结果如图 1 所示, 表 1 是不同谱带区间宽带 k 分布模型的相对误差。计算结果显示: 随着谱带区间增大, 误差增大, 但在三个探测器工作区间的误差都不超过 10%, 故在工程实际中可用宽带 k 分布模型计算液体火箭尾焰的辐射信号。

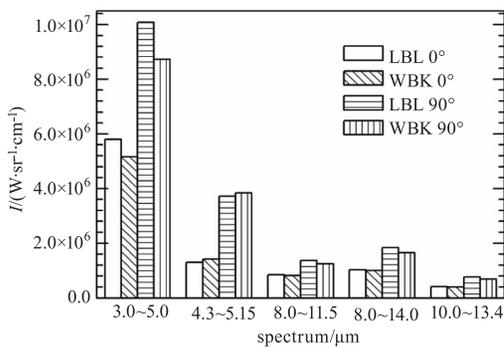


图 1 液体火箭尾焰的辐射强度

Fig. 1 Radiation intensities of liquid rocket plume

表 1 宽带 k 分布模型的相对误差 (%)

Tab. 1 Relative error (%) of WBK

	10 ~ 13.4 μm	8 ~ 11.5 μm	4.3 ~ 5.15 μm	3 ~ 5 μm	8 ~ 14 μm
$\theta = 0^\circ$	2.80	3.26	9.06	10.98	2.80
$\theta = 45^\circ$	8.08	7.86	4.15	15.09	8.74
$\theta = 90^\circ$	9.48	8.55	3.28	13.41	10.09
$\theta = 135^\circ$	8.86	8.63	2.45	17.64	9.67

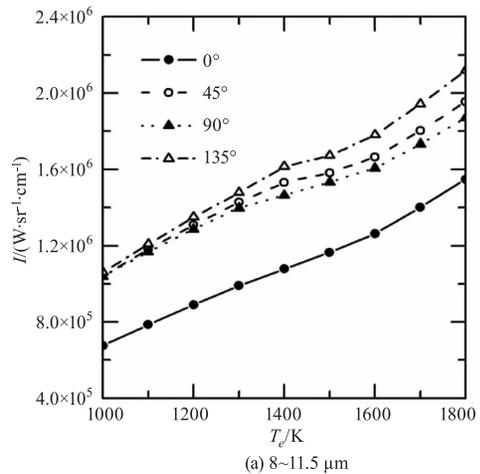
3.2 尾焰辐射信号随飞行参数变化规律

液体火箭尾焰的红外辐射信号随飞行参数的变化而变化, 其中最主要的影响因素是发动机喷口燃气的温度、马赫数、喷口燃气压力与周围大气压力

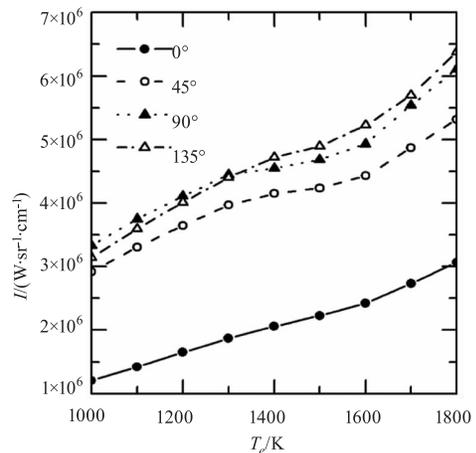
的比值(非计算度)、海拔高度。下面采用宽带 k 分布模型研究飞行参数对液体火箭尾焰辐射信号的影响。探测器的工作光谱区间选 $8.0 \sim 11.5\ \mu\text{m}$ 和 $4.3 \sim 5.15\ \mu\text{m}$ 。液体火箭发动机的喷嘴出口半径为 $r_e = 0.2\text{ m}$, 发动机的其他参数与前面给出的参数相同。

3.2.1 尾焰辐射信号随喷口燃气温度变化规律

火箭发动机燃烧室的温度一般在 $2000 \sim 3000\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, $Ma_e = 3$ 时喷口燃气的温度大约在 $1000 \sim 1800\text{ K}$ 之间^[23]。图 2 是液体火箭尾焰的辐射信号随喷口燃气温度的变化图。随着喷口燃气温度升高, 流场基本不变, 尾喷焰温度升高, 尾焰积分辐射强度随喷口燃气温度升高而增大, 增大速度近似线性。



(a) 8~11.5 μm



(b) 4.3~5.15 μm

图 2 液体火箭尾焰辐射强度随喷口温度变化图

Fig. 2 Variation of radiation intensity of liquid rocket plume with nozzle temperature

3.2.2 尾焰辐射信号随喷口燃气马赫数变化规律

火箭喷口燃气马赫数一般为 $2 \sim 4$ ^[23], 图 3 给出了液体火箭尾焰的辐射信号随喷口燃气马赫数的变

化趋势。因燃气温度不变,燃气声速保持不变,燃气马赫数增加,也就使得燃气流动速度增大,流动区域扩大,马赫盘后气体温度升高很快,从而导致液体火箭尾焰的辐射强度增长速度超过燃气马赫数的平方。

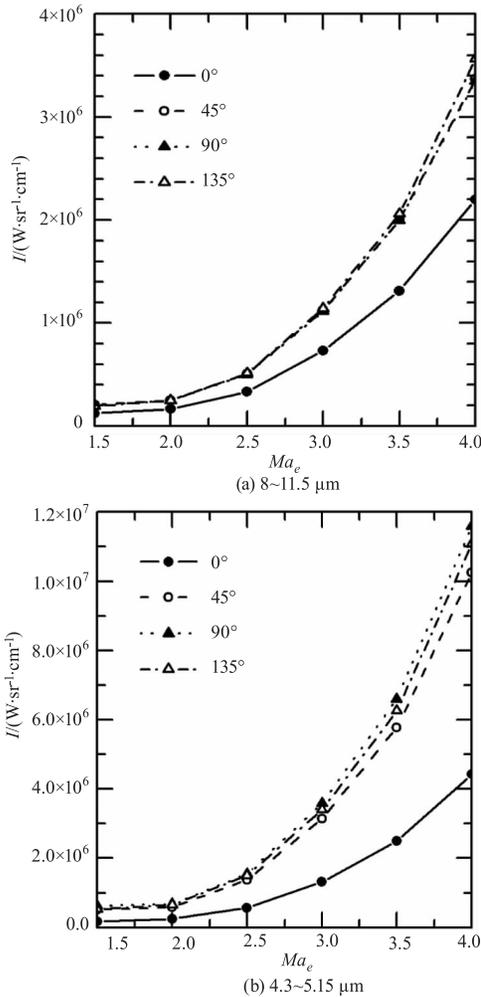


图3 液体火箭尾焰辐射强度随喷口马赫数变化图
Fig. 3 Variation of radiation intensity of liquid rocket plume with nozzle Mach number

3.2.3 尾焰辐射信号随非计算度变化规律

近程火箭发动机的非计算度值常在 $2 \leq p_e/p_a \leq 10$ 之间^[23]。由于喷口燃气压力大于大气压力,燃气一出喷口就迅速膨胀。随着非计算度值增加,膨胀加快,使得马赫盘半径增大,径向方向的流动范围扩大,马赫盘前温度下降增快,但马赫盘后较高温区的长度增加。虽然火箭尾焰单位探测横截面积的辐射因马赫盘前气体温度降低有所减小,但液体火箭尾焰总的积分辐射强度随 p_e/p_a 的增加而增大,且增大速度和非计算度近似成线性关系。采用宽带 k 分布模型计

算结果如图4所示。

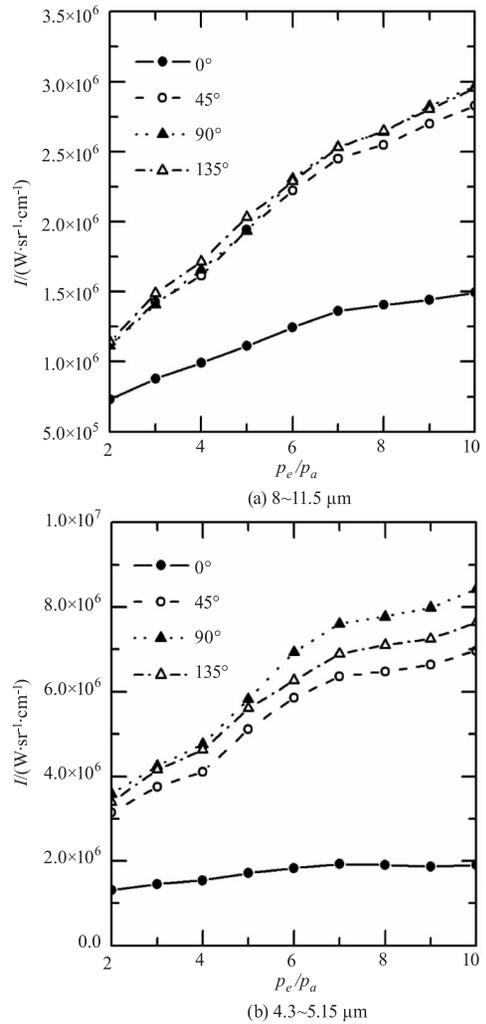


图4 液体火箭尾焰辐射强度随 p_e/p_a 变化图
Fig. 4 Variation of radiation intensity of liquid rocket plume with p_e/p_a

3.2.4 尾焰辐射信号随海拔高度变化规律

随海拔高度的上升,大气的压力和温度变化很大,其中压力相差几个数量级^[24]。当火箭飞行高度高时, p_e/p_a 的值很大,对液体火箭尾焰辐射信号有很大影响。图5显示了不同海拔高度时所对应的液体火箭尾焰的辐射强度。随着 p_e/p_a 增大,火箭尾焰气体出喷口后膨胀越快,马赫盘半径越大,气体温度下降越快。虽然海拔高度增加时探测横截面积由于膨胀有所增加,但由于温度降低单位探测横截面积的辐射强度减小,加上不同温度下的最大光谱黑体辐射力所在的位置不同,使得随着海拔高度的上升,导致 $8.0 \sim 11.5 \mu m$ 谱带的辐射总强度减小,而 $4.3 \sim 5.15 \mu m$ 谱带的辐射强度出现先增大后减小。

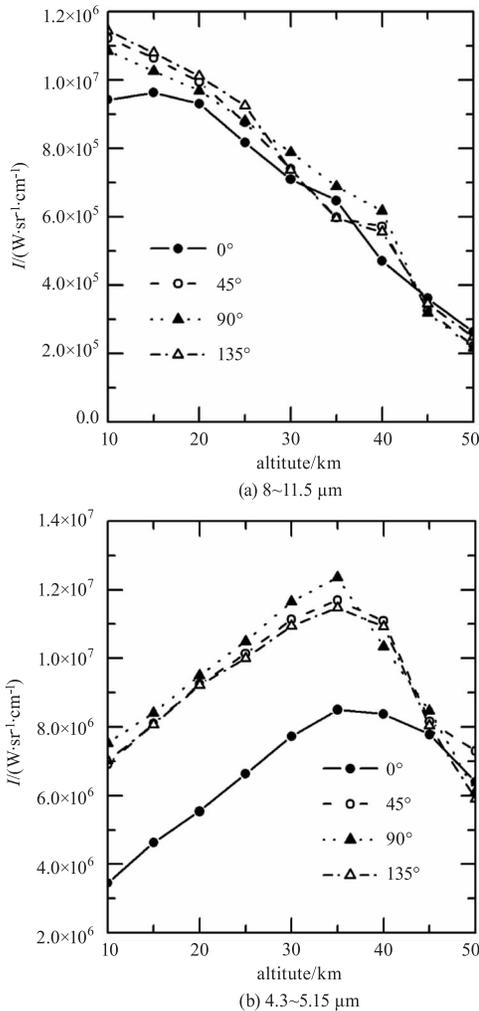


图5 液体火箭尾焰辐射强度随海拔高度变化图

Fig. 5 Variation of radiation intensity of liquid rocket plume with altitude

4 结论

利用工程经验公式求解液体火箭尾焰的温度场和摩尔浓度场后,采用宽带 k 分布模型分析了液体火箭尾焰的红外辐射信号。在探测器工作光谱区间内,与逐线计算法比较,宽带 k 分布模型的计算结果最大相对误差小于 10%。各飞行参数变化都对液体火箭尾焰的红外辐射信号都有影响,喷口燃气马赫数对液体火箭尾焰辐射信号的影响最大,随着马赫数的增大,尾喷焰的辐射强度增加的速度超过喷口燃气马赫数的平方;尾喷焰的积分辐射强度随喷口温度、非计算度的增加近似成线性增大;不同温度下的最大光谱黑体辐射力所在的位置不同,这使得不同探测器工作光谱区间内液体火箭尾焰辐射强度随海拔高度的变化趋势有所不同。

参考文献:

[1] Niu Qinglin, Duan Xihu, Meng Xiaying, et al. Numerical

analysis of point-source infrared radiation phenomena of rocket exhaust plumes at low and middle altitudes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 99:28-38.

- [2] Wang Weichen, Li Shipeng, Zhang Qiao, et al. Infrared radiation signature of exhaust plume from solid propellants with different energy characteristics[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(3):594-600.
- [3] Wang Busheng, Xuan Yimin. An improved WSGG model for exhaust gases of aero engines within broader ranges of temperature and pressure variations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136:1299-1310.
- [4] Zhang Shukun, Cai Jing. Overview of exhaust plume infrared radiation signatures calculation[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(12):1277-1282. (in Chinese)
张术坤, 蔡静. 尾焰红外辐射特性计算研究综述[J]. *激光与红外*, 2010, 40(12):1277-1282.
- [5] Li Xiaobing. Research on the location method of aircraft tail flame with infrared image[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(1):56-60. (in Chinese)
李晓冰. 飞行器尾焰红外图像定位方法研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(1):56-60.
- [6] Nie Wansheng, Cai Honghua. Overview of infrared characteristics study of rocket engine plume[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2017, 28(1):47-53. (in Chinese)
聂万胜, 蔡红华. 火箭发动机尾焰红外辐射特性研究综述[J]. *装备学院学报*, 2017, 28(1):47-53.
- [7] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. Influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4):9-15. (in Chinese)
刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4):9-15.
- [8] Wang Darui, Zhang Nan. Study of liquid rocket engine plume flow field measurement based on the technology of infrared[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2):141-145. (in Chinese)
王大锐, 张楠. 基于红外技术的液体火箭发动机尾焰流场测量研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2):141-145.
- [9] Centeno F R, Brittes R, Franca F H R, et al. Evaluation of gas radiation heat transfer in a 2D axisymmetric geometry using the line-by-line integration and WSGG models[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Trans-*

- fer,2015,156:1-11.
- [10] Chu Huaqiang, Ren Fei, Feng Yan, et al. A comprehensive evaluation of the non gray gas thermal radiation using the line-by-line model in one-and two-dimensional enclosures [J]. Applied Thermal Engineering,2017,124:362-370.
- [11] Qi Chaobo, Zheng Shu, Zhou Huaichun. Calculations of thermal radiation transfer of C_2H_2 and C_2H_4 together with H_2O , CO_2 , and CO in a one-dimensional enclosure using LBL and SNB models [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2017,197:45-50.
- [12] Niu Qinglin, He Zhihong, Dong Shikui. IR radiation characteristics of rocket exhaust plumes under varying motor operating conditions [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017,30(3):1101-1114.
- [13] Zhou Yue, Wang Qiang, Li Ting. A new model to simulate infrared radiation from an aircraft exhaust system [J]. Chinese Journal of Aeronautics,2017,30(2):651-662.
- [14] Zhou Yue, Wang Qiang, Li Ting, et al. A numerical simulation method for aircraft infrared imaging [J]. Infrared Physics & Technology,2017,83:68-77.
- [15] Yin Xuemei, Liu Linhua. Wide band k distribution model for gas absorption and its application in long-range sensing [J]. Infrared and Laser Engineering,2008,37(3):420-423. (in Chinese)
尹雪梅,刘林华. 气体宽带 k 分布模型及其在远程探测中的应用 [J]. 红外与激光工程,2008,37(3):420-423.
- [16] Li Yuxuan, Wang Qiang, Hu Haiyang. Numerical study of multiscale multigroup wide band k -distribution model for remote infrared imaging of marine ejector exhaust system [J]. Infrared and Laser Engineering,2019,48(7):24-33. (in Chinese)
李雨轩,王强,胡海洋. 舰用燃气轮机排气系统远程红外成像多尺度多线组宽带 k 分布模型数值仿真研究 [J]. 红外与激光工程,2019,48(7):24-33.
- [17] Yin Xuemei. Wide band k -distribution model for radiative property calculations of high temperature gas [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)
尹雪梅. 高温气体辐射特性计算的宽带 k 分布模型 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [18] Zhao Chengqing, Jiang Yi. Gas jet dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,1998:134-143. (in Chinese)
赵承庆,姜毅. 气体射流流体力学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1998:134-143.
- [19] Wang Mingdong, Tang Bin. The study of the fluid field about rocket wake [J]. Journal of Institute of Command and Technology,2001,12(6):104-107. (in Chinese)
王明东,唐斌. 火箭尾喷焰流场的研究 [J]. 指挥技术学院学报,2001,12(6):104-107.
- [20] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. Infrared and Laser Engineering,2008,37(1):18-24. (in Chinese)
龚海梅,刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展 [J]. 红外与激光工程,2008,37(1):18-24.
- [21] Guo Caili, Zhou Shijian. An introduction to atmospheric radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press,2004:68-170. (in Chinese)
郭彩丽,周诗健. 大气辐射导论 [M]. 北京:气象出版社,2004:68-170.
- [22] Tian Guoliang. Infrared remote sensing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006:1-23,414-424. (in Chinese)
田国良. 热红外遥感 [M]. 北京:电子工业出版社,2006:1-23,414-424.
- [23] Zhang Fuxiang. Rocket gas jet dynamics [M]. Harbin: Harbin Institute Technology Press,2004:82-221. (in Chinese)
张福祥. 火箭燃气射流流体力学 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004:82-221.
- [24] Shi Guangyu. Atmospheric radiology [M]. Beijing: Science Press,2007:4-210. (in Chinese)
石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京:科学出版社,2007:4-210.