

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0388-03

尾焰红外辐射的光谱特性及空间分布特性的计算

万敏, 冷杰, 杨锐, 路大举, 黄志伟

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对飞机尾焰红外辐射的光谱特性及空间分布特性进行研究, 将满足对飞行器探测或防护的需求。采用Curtis-Godson(C-G)近似得到气体分子的吸收谱线, 进而通过解辐射传输方程, 计算得到了飞机尾焰红外辐射的光谱特性及空间分布特性。通过对所有平行采样视线的积分获得某一观测方向的尾焰辐射强度, 并采用自适应坐标法大大减少了计算量。由于高温二氧化碳和水气的分子发射辐射谱带的存在, 尾焰在以 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 为中心的两个波段内有较强的辐射, 经大气传输后 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 波段的辐射强度大大降低。尾焰红外辐射由于观测方向的不同而具有不同的光谱分布和辐射强度。在前向观测时, 明显具有 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 为中心的两个强的辐射带。后向观测时的辐射较强, 而且选择性辐射的特点不太突出。

关键词 红外; 尾焰; 光谱; 空间分布

中图分类号 O434 文献标识码 A

Computation on Spectral and Spatial Distribution Characteristics of Infrared Radiation of Plume

WAN Min, LENG Jie, YANG Rui, LU Da-ju, HUANG Zhi-wei

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The study on spectral and spatial distribution characteristics of infrared radiation of plume is useful for the demand of detection or defense mechanism of aircraft. The absorption spectrums of gas molecule are obtained by Curtis-Godson approximation. The spectral and spatial distribution characteristics of infrared radiation of plume are computed by solution of radiation transfer equation. The plume radiation intensity of a certain observation direction is obtained by integral on all parallel sample lines of sight. The calculation is reduced by adoption of adaptive coordinates method. There is strong plume radiation in the two bands of $2.7\ \mu\text{m}$ and $4.3\ \mu\text{m}$ due to molecular emission bands of high temperature CO_2 and H_2O , while the radiation intensity in the two bands greatly decreases after atmosphere propagation. The plume spectrum distribution and radiation intensity vary versus the observation direction. There are two distinct radiation bands of $2.7\ \mu\text{m}$ and $4.3\ \mu\text{m}$ when observed from the front. When observed in the backside, the radiation is much stronger and the characteristic of selective radiation is not so clear.

Key words infrared; plume; spectrum; spatial distribution

1 引言

飞行器发动机喷射的高温气流即尾焰, 它在近红外到长波红外波段范围内都可能存在较强的谱线, 该红外辐射为预警、监视和跟踪提供了明显的探测特征。对尾焰辐射的研究涉及光学和流体力学等交叉学科, 研究难度和工作量均较大。早期对尾焰辐射的研究以实验测量为主。实验测量费用昂贵周期长, 为了弥补实验测量工作的不足, 理论计算研究逐步发展起来^[1~8]。本文采用Curtis-Godson(C-G)近似得到气体分子的吸收谱线^[1], 进而通过解辐射

传输方程, 计算得到飞机尾焰红外辐射的光谱特性及空间分布特性。尾焰的流场参量则利用近似工程算法获得^[2~4]。文中通过对所有平行采样视线的积分获得某一观测方向的尾焰辐射强度, 并采用自适应坐标法大大减少了计算量。

2 尾焰辐射传输方程

飞机的尾焰即其燃烧产物, 主要组成包括二氧化碳、水气和一氧化碳等。因此, 对于飞机尾焰而言, 可以不考虑粒子的吸收和散射。根据辐射传输

作者简介: 万敏(1970—), 女, 四川犍为人, 中国工程物理研究院应用电子学研究所博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光学工程的研究。E-mail: minwan_cn@yahoo.com.cn

方程,在位置点 s_t 处的尾焰光谱辐射亮度 $L(\omega, s_t)$ 可视为

$$L(\omega, s_t) = L_n \tau(\omega, s_n, s_t) - \int_{s_n}^{s_t} L_b(\omega, s) \frac{\partial}{\partial s} \tau(\omega, s, s_t) ds, \quad (1)$$

式中 L_n 为尾喷口的光谱辐射亮度, $\tau(\omega, s, s_t)$ 为传输路径上任意点 s 到点 s_t 的透过率, ω 为波数, s_n 为尾喷口位置, $L_b(\omega, s)$ 为传输路径上任意点 s 的黑体辐射亮度。

将尾焰沿视线方向分成温度和组分压强均匀的层(设共有 N 层),则有

$$L(\omega, s_t) = L_n \tau(\omega, s_n, s_t) - \sum_{i=1}^N L_b(\omega, s_i) [\tau(\omega, i, s_t) - \tau(\omega, s_{i-1}, s_t)], \quad (2)$$

式中 $\tau(\omega, s_i, s_t)$ 为传输路径上第 i 层到点 s_t 的透过率,对于组成尾焰的非均匀气体,采用 C-G 近似可计算得到^[1]。

3 数值计算方法

尾焰光谱辐射亮度的计算基础是尾焰的流场参量,包括尾焰的气体组成、压强、温度等。为了在合理的近似下减少计算量,采用了尾焰流场参量的近似工程算法,该算法通过大量简化对流场严格求解的纳维-斯托克斯方程组的计算过程,并引进经验和半经验参量形成。近似工程算法将流场简化为由初始段和基本段组成,在初始段内存在一三角核心区,近似认为具有等温等压等速的特性。尾焰流场如图 1 所示,具体计算方法可参见参考文献^[2]。

由于探测距离远大于尾焰尺度,因此在进行计算时,可近似认为在无穷远处进行探测。对任一观测方向,可采用多条穿越尾焰的平行视线对尾焰辐射进行采样,如图 1 所示。每一条视线的尾焰辐射

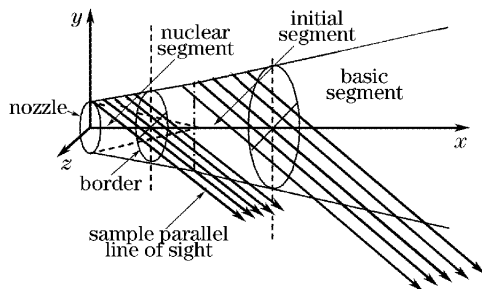


图 1 尾焰流场示意图

Fig. 1 Fluid field of plume

亮度根据辐射传输方程计算得到,将尾焰沿视线方向分成温度和组分压强均匀的层,对层数积分计算得到该视线的尾焰辐射亮度。在某一观测方向的尾焰辐射强度则通过对所有采样视线的积分获得。对尾焰辐射亮度的计算中,计算采样点相当多,需要进行三重积分的计算。这里采用自适应坐标的方式,随着尾焰的横向尺度的增大调整采样间距,在保证一定计算精度的前提下大大减少了计算量。

穿越尾焰后的光谱辐射由于尾焰与观测点之间的大气吸收和散射在到达观测点时已大大衰减。为了减少计算量,在计算尾焰辐射亮度时,将虚拟观测点置于尾焰表面,辐射传输计算仅涉及到该视线穿越的尾焰内部采样点。虚拟观测点与实际观测点之间的大气透过率采用 Modtran 计算得到。

4 尾焰红外辐射的光谱特性及空间分布特性计算结果

计算了不同观测方向上的飞机的尾焰光谱辐射强度,考虑了飞机侧前方 45° 和侧后方 45° 两个观测方向。设观测距离为 15 km,飞机尾焰辐射经 1 km 高度的水平大气传输 15 km 后,由于大气吸收、散射等因素造成了辐射强度的衰减。由 Modtran 计算得到 15 km 水平大气传输的大气透过率,如图 2 所示,大气中的水气和二氧化碳在 $1.9 \mu\text{m}$, $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近存在分子吸收带,导致了这几个波段的强烈的衰减。尾焰大气衰减前后的光谱辐射强度分别如图 3,图 4 所示。在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段,飞机侧前方 45° 大气衰减前后的尾焰辐射强度分别为 399.8 W/Sr 和 20.8 W/Sr ,侧后方 45° 大气衰减前后的尾焰及喷管的组合辐射强度分别为 1098.6 W/Sr 和 188.6 W/Sr 。

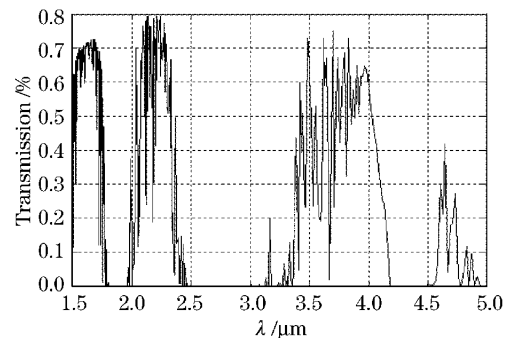


图 2 大气透过率示意图 (Modtran 计算)

Fig. 2 Atmospheric transmission (Modtran)

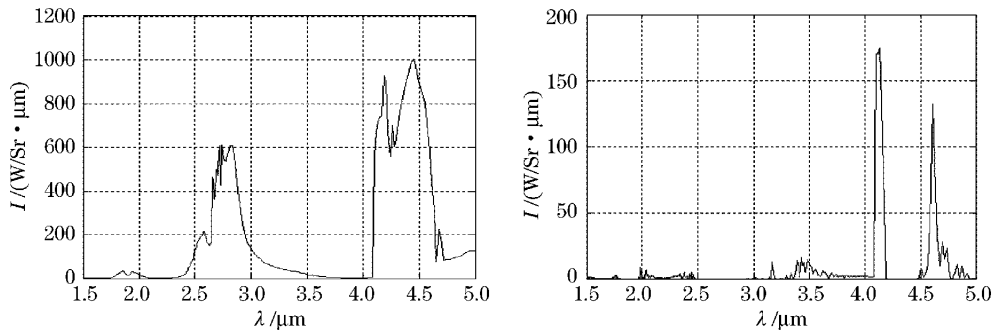


图 3 从飞机侧前方观测到的尾焰光谱辐射强度

Fig. 3 Spectral radiant intensity of airplane plume observed from side rake

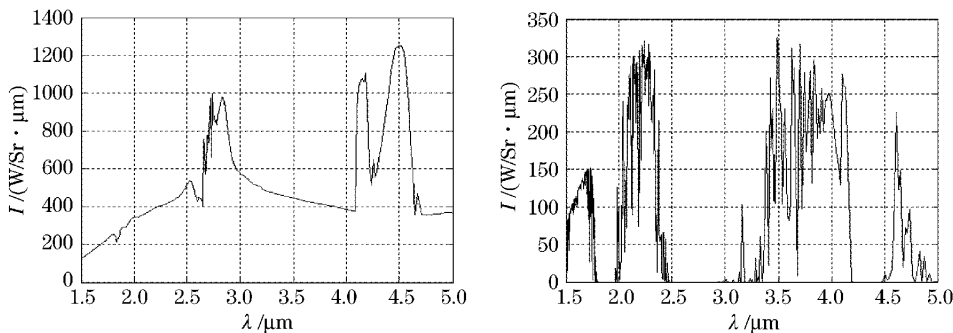


图 4 从飞机侧后方观测到的尾焰及喷管的组合光谱辐射强度

Fig. 4 Spectral radiant intensity of airplane plume and nozzle observed from bevel back

5 结 论

尾焰是一种选择性很强的辐射体,由于高温二氧化碳和水气的分子发射辐射谱带的存在,尾焰在以 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的两个波段内有较强的辐射。经大气衰减后由于大气中二氧化碳和水气的分子吸收,导致尾焰在以 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的两个波段内受到强烈的吸收,从而原有较强辐射的 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 波段的辐射强度大大降低。

尾焰红外辐射由于观测方向的不同而具有不同的光谱分布和辐射强度。在前向观测时,明显具有 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的两个强的辐射带。在后向观测时,观测到的是尾焰和飞机尾喷管的组合辐射,由于尾喷管灰体辐射的存在,尾焰的选择性辐射的特点不太突出。尾喷管的热辐射还将受到高温尾焰的强烈吸收,从而在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的两个波段形成凹陷。在后向观测时,同样由于尾喷管辐射的存在,其辐射较强。特别在经过大气衰减后,由于尾喷管的灰体辐射特性,后向观测的尾焰辐射强度要远大于前向。

参 考 文 献

1 C. B. Ludwig, W. Malkmus, J. E. Reardon *et al.*. Handbook

of infrared radiation from combustion gases [R]. Washington D. C.: NASA SP-3080, 1973

2 Xu Genxin. Optical Characteristics of Object and Environment [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1995

徐根兴. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995

3 Zhang Haixing, Zhang Jianqi, Yang Wei *et al.*. A theoretical calculation of the IR radiation of the 2D-nozzle plume [J]. *J. Xidian University*, 1998, **25**(1): 36~42

张海兴, 张建奇, 杨 威 等. 二元喷管尾焰红外辐射的理论计算 [J]. 西安电子科技大学学报, 1998, **25**(1): 36~42

4 Wang Mingdong, Tang Bin. The study of the fluid field about rocket wake [J]. *J. Institute of Command and Technology*, 2001, **12**(6): 104~107

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

5 Xu Nanrong, Qu Rongzhen. Infrared signature of flight vehicles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 8~14

徐南荣, 瞿荣贞. 飞行器的红外特性 [J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(1): 8~14

6 Wang Mingdong, Shi Yanmei. Engineering calculation for infrared radiance of aircraft wake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, **27**(6): 1~4

王明东, 施燕妹. 飞行器尾焰红外辐射的一种工程算法 [J]. 红外与激光工程, 1998, **27**(6): 1~4

7 Dou Xiaomu, Yue Xiaokui, Luo Jianjun *et al.*. Algorithm for omnidirectional IR radiation of jet aircrafts [J]. *Infrared Technology*, 1997, **19**(3): 5~7

窦晓牧, 岳晓奎, 罗建军 等. 喷气式飞机全向红外辐射特性计算方法 [J]. 红外技术, 1997, **19**(3): 5~7

8 Zhang Haixing, Zhang Jianqi, Yang Wei *et al.*. Theoretical calculation of the IR radiation of an acroplane [J]. *J. Xidian University*, 1997, **24**(1): 78~81

张海兴, 张建奇, 杨 威 等. 飞机红外辐射的理论计算 [J]. 西安电子科技大学学报, 1997, **24**(1): 78~81