

来袭飞机的红外辐射及其大气传输特性研究

赵楠, 李晓霞, 马森, 郭宇翔, 孙通

(电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:研究了来袭飞机的三个主要红外辐射源(尾焰、尾喷管和蒙皮)的红外辐射特性,以及各自主要辐射波段在大气中衰减的情况。通过优化模型,计算得到了其各自主要辐射波段的红外辐射强度。并根据三个辐射源各自主要辐射波段的大气透过率的计算,得到经过相同大气路程衰减后,最终到达红外探测器的辐射强度。

关键词:飞机红外辐射;尾焰;蒙皮;尾喷管;大气透过率

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.08.011

Research of infrared radiation and atmospheric transmittance of an incoming airplane

ZHAO Nan, LI Xiao-xia, MA Sen, GUO Yu-xiang, SUN Tong

(Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: IR characteristics of three kinds of radiation sources of the incoming airplane (plume, hot spot and fuselage) and their attenuation in atmosphere is studied. According to optimal calculation model, the infrared radiant intensity at the main-band is obtained. Furthermore, a simple calculation method for the atmospheric transmittance at the main-band is introduced. The radiant intensity received by the IR detector is calculated.

Key words: infrared radiation of airplane; plume; hot spot; fuselage; transmittance of atmosphere

1 引言

准确获取来袭飞机的红外辐射特征,对于红外告警、导弹拦截和防空训练具有重要意义。但实际获取这些信息十分困难,所以这方面的红外仿真一直都是国内外研究的热点。而来袭飞机的红外特性和其红外辐射在大气中的衰减是红外仿真的重点。本文结合影响来袭飞机红外辐射特征主要因素的研究,对其尾焰和蒙皮的几何投影模型进行了弥补和简化,并且计算得到三个辐射源经过相同大气斜程后,最终到达红外探测器的辐射强度。

2 飞机的红外特性

喷气式飞机的红外辐射源主要由三部分组成:尾焰、发动机尾喷管、蒙皮。

2.1 尾焰

航空煤油经过发动机燃烧室燃烧后,从喷口排出的大量燃烧产物(忽略粒子影响)主要是 CO₂ 和

H₂O,两者均为选择性辐射体,具有不连续的线状或带状光谱^[1]。尾焰的红外辐射在不同波长上存在较大的波动,而且其特征受其成分、密度、几何形状及动力装置的工作状态等一系列因素所制约。工程应用方面,为了便于计算,一般根据实测来进行近似估算。中红外波段的研究和实测表明,尾焰的辐射主要是 CO₂ 的 4.3 ~ 4.8 μm 辐射带^[2]。在实际计算时应当考虑 4.1 ~ 4.2 μm, 4.3 ~ 4.8 μm 这两个辐射带^[3]。

通过排气喷嘴膨胀后的气体温度 T_2 为:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

作者简介:赵楠,男,硕士研究生,主要研究方向为红外仿真。
E-mail:1506668476@qq.com

收稿日期:2011-11-17;修订日期:2011-12-10

式中, T_1 为尾喷管内气体温度(实质上是排出气体温度); P_2 为膨胀后的气体压力; P_1 为尾喷管内气体压力; γ 为气体的定压热容和定容热容之比。对于航空发动机一般取 1.3。

工程计算中, 涡轮喷气式航空发动机一般取 $P_2/P_1=0.5$, 则有 $T_2=0.85 T_1$; 对于涡轮风扇航空发动机, 一般取 $P_2/P_1=0.4$, 则有 $T_2=0.81 T_1$ 。因此, 对于给定的尾喷管里的气体温度 T_1 , 容易计算出通过排气喷嘴膨胀后的温度 T_2 。

据此温度, 可以计算尾焰的光谱辐射强度 I_1 为:

$$I_1 = \frac{\varepsilon_1 S_1}{\pi} \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_2} - 1} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_2} - 1} d\lambda \right) \quad (2)$$

式中, 积分区间分别为 $4.1 \sim 4.2 \mu\text{m}$, $4.3 \sim 4.8 \mu\text{m}$; ε_1 为尾流的等效发射率, 在积分区域内一般取 0.5; S_1 为尾焰的投影面积; 第一辐射常数 $c_1 = 3.741832 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; 第二辐射常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

参考文献[4], 并且考虑从迎头方向观测时机体对尾焰的遮挡, S_1 可表示为:

$$S_1 = \begin{cases} R_0 L \sin\theta & 0 \leq \theta < 90^\circ \\ \pi R_0^2 |\cos\theta| + \frac{R_0}{L \sin\theta} (L \sin\theta - R_0 |\cos\theta|)^2 & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_0 为尾喷口半径; L 为尾焰长度; θ 为观测方向与机体中心线的夹角。

2.2 尾喷管

尾喷管的红外辐射是飞机整体红外辐射的重要组成部分。在工程计算中, 一般认为尾喷管是有效发射特性为 0.9 的灰体, 辐射温度等于排出气体的温度, 面积为尾喷口的面积 S_2 。则尾喷管在 $\lambda_5 \sim \lambda_6$ 波段的辐射强度 I_2 可以通过下式计算:

$$I_2 = 2 \frac{\varepsilon_2 \sigma T_e^4}{\pi} [F(\lambda_6 T) - F(\lambda_5 T)] S_2 \cos\theta \quad (4)$$

式中, ε_2 为尾喷管发射率, 一般取 0.9; $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_e 尾喷管的辐射温度; $F(\lambda T)$ 其值可查阅黑体 $F(\lambda T)$ 函数表得到; $\lambda_5 \sim \lambda_6$ 一般取 $3 \sim 5 \mu\text{m}$; S_2 为尾喷口面积; θ 为观测方向与尾喷管纵截面法向方向的夹角(与观测方向与机体中心线的夹角相等)。

2.3 蒙皮

飞机在大气中高速运动时, 由于空气气动加热其外表面温度升高, 造成蒙皮不均匀的温度梯度。飞机周围大气温度、自身飞行速度是影响气动加热的主要因素。

大气温度 T_0 随高度 H 的变化规律如下^[5]:

对流层 ($0 < H < 11000 \text{ m}$) $T_0 = (288.2 \sim 0.0065 H) \text{ K}$; 平流层 ($11000 \text{ m} < H \leq 20000 \text{ m}$) $T_0 = 216.7 \text{ K}$, ($20000 \text{ m} < H \leq 32000 \text{ m}$) $T_0 = 216.7 + 0.001(H - 20000) \text{ K}$ 。

在飞机前缘, 空气气流完全静止的点称为驻点。运动着的气流在驻点将动能以高压和高温的形式转化成蒙皮内能。此时驻点温度 T_s 可以由如下的经验公式进行计算:

$$T_s = T_0 \left[1 + r \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M^2 \right] \quad (5)$$

式中, T_0 为周围大气的温度 (K); r 是恢复系数, 取决于附面层中的情况(层流流动 r 取 0.82; 紊流流动 r 取 0.87); γ 是空气定压热容和定容热容之比, 其值为 1.4; M 为马赫数。

由式(5)得到驻点温度后, 蒙皮的辐射强度 I_3 可以根据下式计算:

$$I_3 = \frac{\varepsilon_3}{\pi} \sigma T_s^4 [F(\lambda_8 T_s) - F(\lambda_7 T_s)] S_3 \quad (6)$$

式中, $F(\lambda T)$ 其值可查阅黑体 $F(\lambda T)$ 函数表得到; $\lambda_7 \sim \lambda_8$ 一般取 $8 \sim 13 \mu\text{m}$; ε_3 为蒙皮发射率, 一般取 0.6; S_3 为蒙皮的投影面积。

根据文献[6], 计算飞机蒙皮投影面积时, 可以从机头、机身和机翼三方面考虑。

$$S_3 = \begin{cases} S_{\text{机头}} \cos\theta + (S_{\text{机身}} + 2S_{\text{机翼}}) \sin\theta & 0 \leq \theta < 90^\circ \\ S_{\text{机身}} + 2S_{\text{机翼}} \sin\theta & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中, θ 为观测方向与机体中心线的夹角。

3 红外辐射的大气传输

大气对红外辐射的衰减, 一般从大气气体分子的吸收, 大气分子、气溶胶、微粒的散射以及气象条件所引起的衰减。以上三种衰减为红外探测器有效地搜索、警戒以及跟踪等带来了诸多不便。

3.1 大气气体分子的吸收

研究表明, 大气中吸收红外辐射的主要因素是水蒸气和二氧化碳。

大气中水蒸气含量用可凝结水的毫米数 W 来度量, 定义为底面 S 和长度等于红外系统到目标距离 X 的圆柱体内大气所含水汽凝结的水层厚度可表示为:

$$W = \rho_w X = \rho_s w X \quad (8)$$

式中, ρ_w 为水蒸气的密度; ρ_s 为饱和水蒸气的密度; X 为以 km 为单位的路程的数值; w 为空气的相对湿度。

查表可知, 在 W 一定时, 各个波长对应的透射比。

但是, 根据文献[7], 在倾斜路程传输的情况下, 需要引入水汽含量随高度变化的修正因子, 则式

(8)变为:

$$W = \rho_s w \frac{1 - e^{-0.5154H}}{0.5154 \cos \eta} \quad (9)$$

式中, H 为目标高度; $\cos \eta = H/X$ 。观测点海拔为 0。

由于大气中二氧化碳在大气中的浓度是常数。因此, 它的吸收所造成的辐射衰减, 可以认为只与辐射传输的路程有关, 而与气象条件无关。文献[8]给出了二氧化碳在 0.7 ~ 6.9 μm 海平面上水平路程 0.1 ~ 1000 km, 以及在 7 ~ 14 μm 海平面上水平路程 0.2 ~ 200 km 的光谱透过率。

同样根据文献[7], 综合考虑二氧化碳的吸收特性等因素, 得到由倾斜路程折算后的水平路程:

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{1 - e^{-0.313H}}{0.313 \cos \eta} \quad (10)$$

查表可知在路程一定时各个波长对应的透射比。

3.2 大气总分子、气溶胶、微粒的散射

由散射衰减导致的透射比公式:

$$\tau_s(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q X\right] \quad (11)$$

式中, V 为气象视界; $\lambda_0 = 0.61$ 或 $0.55 \mu\text{m}$ (因为这些波长处吸收实际上为零, 其衰减只是由散射造成的); q 是经验常数(当大气能见度特别好时, V 大于 80 km, $q = 1.6$; 中等能见度, $q = 1.3$, 如果大气中霾很浓厚, V 小于 6 km, 可取 $q = 0.585 V^{1/3}$)。

3.3 气象条件所引起的衰减

雨、雪粒子尺寸通常远大于红外辐射波长, 根据米氏理论, 上述粒子将产生非选择性辐射散射。研究表明, 与降雨、降雪强度相关的衰减系数 α 可以采用在 10.6 μm 处得到的经验公式:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & J_r = J_s = 0 \\ 0.66 J_r^{0.66} + 6.5 J_s^{0.7} & J_r \text{ 或 } J_s \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, J_r, J_s 分别为降雨、降雪强度, 单位为 mm/h。

由雨雪的衰减所导致的透过率为:

$$\tau_\alpha(\lambda) = \exp(-\alpha \cdot X) \quad (13)$$

3.4 大气的平均透过率

综上所述, 考虑上述因素引起的衰减可得大气光谱透过率为:

$$\tau_{\text{air}}(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \tau_s(\lambda) \tau_\alpha(\lambda) \quad (14)$$

大气的平均透过率表示为:

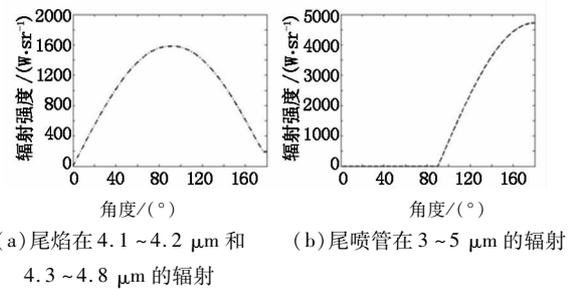
$$\bar{\tau}_{\text{air}} = \frac{d\lambda}{\Delta\lambda} \left[\frac{1}{2} (\tau_{\text{air}}(\lambda_0) + \tau_{\text{air}}(\lambda_m)) + \sum_1^{m-1} \tau_{\text{air}}(\lambda_i) \right] \quad (15)$$

取: $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2, d\lambda = 0.1 \mu\text{m}$ 。

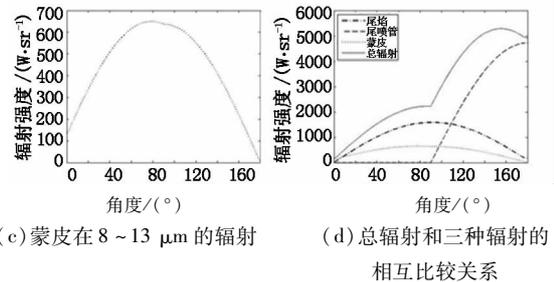
4 计算结果及分析

基于以上理论研究, 以某涡轮喷气式飞机为例,

假定其飞行速度为 2 Ma, 飞行高度为 12 km, 尾喷管温度为 1100 K, 尾喷口直径 0.6 m, 尾焰长度为 8 m, 环境温度为 298 K, 气象视界为 13.8 km, 相对湿度为 60%, 目标距离红外探测器 20 km, 无雨、雪天气。根据以上条件, 通过式(2)、式(4)、式(6)分别计算了尾焰、尾喷管和蒙皮在各自辐射波段上、不同角度上的辐射及其总辐射, 如图 1(a) ~ 图 1(d) 所示。通过式(15)计算得到了三种辐射源各自特征波段的大气平均透过率, 分别为 0.104, 0.228, 0.384。最终得到了三种辐射源最终分别到达红外探测器的辐射和总辐射如图 2(a) ~ 图 2(d) 所示。

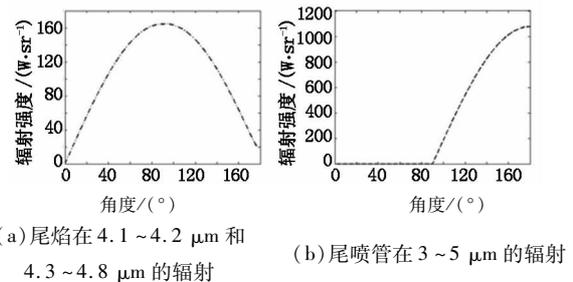


(a) 尾焰在 4.1 ~ 4.2 μm 和 4.3 ~ 4.8 μm 的辐射 (b) 尾喷管在 3 ~ 5 μm 的辐射

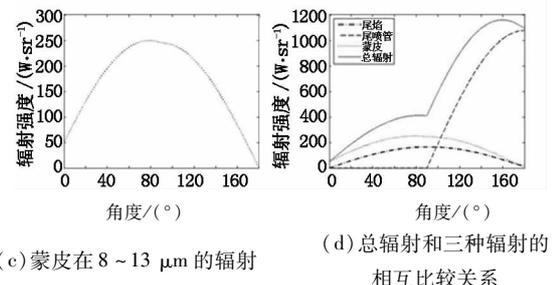


(c) 蒙皮在 8 ~ 13 μm 的辐射 (d) 总辐射和三种辐射的相互比较关系

图 1 不同角度上来袭飞机的辐射强度



(a) 尾焰在 4.1 ~ 4.2 μm 和 4.3 ~ 4.8 μm 的辐射 (b) 尾喷管在 3 ~ 5 μm 的辐射



(c) 蒙皮在 8 ~ 13 μm 的辐射 (d) 总辐射和三种辐射的相互比较关系

图 2 经 20 km 衰减后, 不同角度上来袭飞机的辐射强度

对比图 1 和图 2, 可以看出, 衰减前后, 三种辐射源在不同观测角度的辐射强度变化趋势基本相

同。分别比较同一辐射源经过大气衰减前后的辐射强度,可以发现经大气衰减后的辐射强度均有不同程度的大幅度降低。其中,尾焰的辐射强度减小尤为严重。

由图 1(d) 和图 2(d) 对比可知,由于尾焰在 $4.1 \sim 4.2 \mu\text{m}$, $4.3 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 的大气平均透过率要远小于蒙皮在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段的大气平均透过率,虽然尾焰产生的辐射要大于蒙皮的,但是经过 20 km 的大气衰减后到达探测器的辐射却是蒙皮的较大。这主要是由于中红外波段($3 \sim 5 \mu\text{m}$)存在水蒸气和二氧化碳的强吸收带造成的。

在迎头方向探测时,由于机体遮挡住了尾喷管, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的辐射源主要是尾焰。而尾焰在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射很小,蒙皮则称为 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段的辐射源。在尾追方向探测时, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的辐射源是飞机的尾喷管。因此,在红外探测器一定的情况下,通过调整观测方向,获得研究所需的飞机红外辐射参数。

5 结论

通过对来袭飞机主要红外辐射源(蒙皮、尾焰和尾喷口)的红外辐射特征的理论分析、建立模型和仿真计算,得到三者经过相同大气路程衰减后,最终到达红外探测器的辐射强度。通过与文献[6]比较,衰减前后的红外辐射变化趋势是相同的。并通过相同大气路程上尾焰和蒙皮红外辐射衰减的差异,验证了水蒸气和二氧化碳在中红外波段的强吸收作用。建立的计算模型对红外仿真等方面的研究具有一定的参考价值。鉴于研究过程中飞机的飞行状态(静止、左右摇摆、俯冲及翻滚)、蒙皮表面的性质(形状、大小及反射率等)、蒙皮反射的太阳辐射等大气透过率的区域差异等诸多影响因子的不确定性^[9-10],本文计算结果的精度有待提高。

参考文献:

- [1] Zhang Shukun, Cai Jing. Overview of exhaust plume infrared radiation signatures calculation[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1277 - 1281. (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 - 1281.
- [2] Zhou Dingxin. The calculation methods and initial proof of infrared radiant intensity from nose aspect of jet airplane [J]. Chin. J. IR. Res, 1982, (4): 247 - 256. (in Chinese)
- [3] Hudson R D. Infrared system engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Inc. 1969: 85 - 103.
- [4] Wang Xia, Chen Huachu. Algorithm of infrared signature of aeroplane along the line of sight [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 217 - 222. (in Chinese)
王霞, 陈华础. 视线方向上飞机红外特性计算方法 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(3): 217 - 222.
- [5] Hou Shurong. Practical fluid mechanics [M]. Changchun: The Aeronautical University of the China People Liberation Airforce, 2004: 50 - 52, 224 - 226. (in Chinese)
侯树荣. 实用流体力学 [M]. 长春: 空军航空大学, 2004: 50 - 52, 224 - 226.
- [6] Mao Xia, Hu Haiyong, Huang Kang, et al. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(10): 1228 - 1231. (in Chinese)
毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射强度及大气透过率计算方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1228 - 1231.
- [7] Wu Hanping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere [J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(4): 35 - 43. (in Chinese)
吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法 [J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35 - 43.
- [8] Zhan Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an. Publishing Compang of Xidian University, 2004: 167 - 177. (in Chinese)
张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安. 西安电子科技大学出版社, 2004: 167 - 177.
- [9] Wang Jingjing, He Yongqiang. Compare aircraft's IR radiation with dragging Bait's [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1): 55 - 58. (in Chinese)
王晶晶, 何永强. 飞机与其拖曳型诱饵的红外辐射特征比较 [J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 55 - 58.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli. Variation of infrared atmospheric transmittance based on atmospheric models in typical of China [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(11): 1090 - 1093. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理. 基于中国典型地区大气模型的红外透过率变化特征 [J]. 激光与红外, 2008, 38(11): 1090 - 1093.