

视线方向上飞机红外特性及大气衰减模型研究

张亮, 赵峰, 王雪松

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对飞机目标3个辐射源蒙皮、尾焰及尾喷管进行了深入分析, 建立了视线方向飞机红外辐射计算模型, 并综合考虑大气衰减的主要因素, 分析了大气衰减对红外辐射的影响, 给出了一种大气透过率的计算方法。最后以3~5 μm波段为例, 计算了某飞机的红外辐射强度、大气透过率和经过衰减后的飞机红外辐射强度。

关键词: 飞机; 红外辐射; 大气衰减; 计算模型

中图分类号: TN21 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2011)06-0367-05

Calculation Model for Aeroplane IR Signature and Atmospheric Attenuation Along the Line of Sight

ZHANG Liang, ZHAO Feng, WANG Xue-song

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The algorithm of infrared signature of aeroplane along the line of sight is studied. Three infrared radiation sources of the aeroplane are researched: skin, spout and plume. The model of infrared signature of aeroplane along the line of sight is proposed. According to the propagation of infrared radiation in atmosphere, the attenuation effects of atmosphere absorbing, dispersion and meteorological attenuation are analyzed, then a calculation method for the propagation in atmosphere is introduced. Finally an example of the calculation model is given.

Key words: aeroplane, infrared signature, atmospheric attenuation, calculation model

引言

飞机是具有较强红外辐射特征的空中目标之一, 利用其红外辐射特征来引导防空武器进行攻击, 已成为一种很重要的制导方法。因此, 研究飞机的红外辐射特征及大气红外传输特性, 具有很现实的意义。

通常的目标红外辐射特征模型计算过程十分复杂, 且较少与探测系统视线方向联系起来分析^[1], 不能满足工程应用要求。在实际应用中, 影响红外系统探测的主要是视线方向的红外辐射强度, 此外, 考虑到红外辐射在大气中传输会发生衰减, 红外系统探测到的是经过衰减后的红外辐射。本文对视线方向飞机红外辐射特征进行建模, 根据飞机的几何形状将飞机分成多个灰体辐射源(蒙皮、尾喷管、尾焰等), 并对其形状进行近似求得视线方向的投影面积, 分别计算每个辐射源的辐射强度, 最后进行相加求和得到飞机总的辐射强度。然后综合各种因素给出了一种较为

简单的大气透过率的计算方法。

1 目标坐标和飞机红外辐射

为了计算目标的红外辐射, 必须知道目标和观察者的相对位置和取向, 以及目标的几何形状。为简化处理, 假定远距离观察且飞机相对于地面水平飞行, 并忽略飞机滚动和俯仰所带来的误差。这里建立一个与目标固联的右手笛卡尔坐标系统, 且随目标体转动或倾斜。假设坐标中心在目标上, Z 轴垂直向上, X 轴和 Y 轴在机体水平面上, X 轴指向飞机前进方向, Y 轴指向机体左舷一侧。观察者用球坐标系表示, 从原点指向观察者的单位矢量视为视线方向, 它由方位角 θ 和俯仰角 ϕ 确定, 方位角从前端看逆时针为正。飞机目标的红外辐射主要由三部分组成: 蒙皮红外辐射、尾喷管红外辐射和尾焰红外辐射, 总的辐射是上述三部分在观察方向上的线性叠加。可将蒙皮、尾喷管和尾焰看成具有一定发射率的灰体, 有:

收稿日期: 2010-10-30。

作者简介: 张亮(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为雷达对抗、光电对抗等。

基金项目: 装备预先研究项目。

$$L(\lambda, T) = \varepsilon M(\lambda, T) / \pi \quad (1)$$

式中: $L(\lambda, T)$ 为光谱辐射亮度; T 为灰体的温度; ε 为灰体的发射率; $M(\lambda, T)$ 为黑体辐射的光谱辐射度, 并根据普朗克定律, 可得:

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

式中: c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数。若能得到蒙皮、尾喷管或尾焰在观察方向上的投影面积 A , 则其在相应方向的光谱辐射强度 I 为:

$$I = L \cdot A \quad (3)$$

综上所述, 飞机的红外辐射由蒙皮、尾喷管或尾焰的温度、发射率和其在观察方向的投影面积决定^[5]。下面分别对蒙皮、尾喷管和尾焰进行计算。

1.1 蒙皮红外辐射

根据气动加热理论, 蒙皮的温度可采用下式计算:

$$T_s = T_0(1 + 0.164V^2) \quad (4)$$

式中: T_s 为蒙皮驻点温度; T_0 为周围大气的温度; V 为飞行的速度。

将飞机蒙皮进行简化, 假设它由机头、机身和机翼几部分构成, 面积分别为 \tilde{A}_h 、 \tilde{A}_b 和 \tilde{A}_w 。其在视线方向的投影面积分别为:

$$A_h = \tilde{A}_h \cos \theta \cos \phi \quad (5)$$

$$A_b = \tilde{A}_b \sqrt{\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \sin^2 \theta} \quad (6)$$

$$A_w = \tilde{A}_w |\sin \phi| \quad (7)$$

且若 $\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$ 时, A_h 为 0。则整个蒙皮在视线方向的投影为:

$$A_s = A_h + A_b + 2A_w \quad (8)$$

1.2 尾焰红外辐射

尾焰通常指涡轮发动机和火箭排出的气体, 对飞机的红外辐射贡献很大。文献[2]将尾焰按照温度和压强分层, 分别计算每层尾焰的辐射亮度和透过率, 计算过程较为复杂。可认为尾焰的大部分辐射来自于非半流体区出口面的附近, 而这个区域内温度和物质浓度变化较小, 可近似为常数。文献[3]提供了一种近似的锥形尾焰模型, 并给出从正舷侧至尾部观察时尾焰投影面积的计算方法。但它将观察方向局限在飞机水平面内, 不能满足任意观察方向上对尾焰投影面积的计算。为计算任意观察方向上尾焰的投影面积, 引入视线角 α , α 为视线方向与飞机前进方向的夹角, 满足:

$$\alpha = \arccos(\cos \theta \cos \phi) \quad (9)$$

$\alpha \in [0, 180^\circ]$, 并设迎头探测时 α 为 0° , 尾部探

测时 α 为 180° 。可知当 α 较小时, 由于机身的遮挡, 视线方向上尾焰的投影面积为 0。

由圆锥的轴对称性, 并根据 α 的不同, 可得到五种不同的锥形尾焰的投影面积组合, 如图 1 所示。1) $\alpha_1 \leq \alpha < 90^\circ$, 三角形出椭圆边界之外的部分, 尾焰不被全部遮挡; 2) $\alpha = 90^\circ$, 三角形截面; 3) $90^\circ < \alpha \leq \alpha_2$ 时, 完整的椭圆加小的扩展三角形; 4) $\alpha_2 < \alpha \leq 180^\circ$, 完整的椭圆; 5) $\alpha = 180^\circ$, 完整的圆面。恒定值 α_1 和 α_2 满足:

$$\alpha_1 = \arctan(L/R) \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \pi - \arctan(L/R_0) \quad (11)$$

式中: R 为机身半径; R_0 为喷口的锥底半径; 尾焰长度为 L , 且 R_0 和 L 由排出气的马赫数 M_e 、涡流混合效率 κ_1 以及环境自由气流 ρ_0 和排出气 ρ_e 之间的密度差 $\Delta \bar{\rho}_e = \rho_e / \rho_0$ 共同决定:

$$L = 0.7R_0 / \kappa (\Delta \bar{\rho}_e)^{1/2} \quad (12)$$

$$\kappa = 0.08(1 - 0.16M_e)(\Delta \bar{\rho}_e)^{-0.22} \quad (13)$$

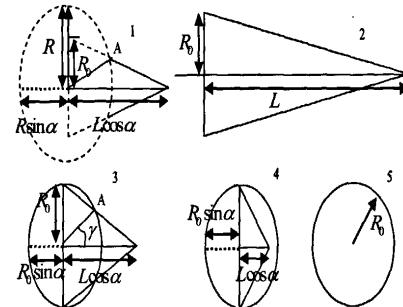


图 1 锥形尾焰的不同投影

Fig.1 Projections of tapered plume

采用解析的方法可以得到三角形出椭圆边界之外的面积为:

$$S = b l \sin \gamma - a b \gamma \quad (13)$$

式中: b 、 a 分别为椭圆的长短轴; l 为三角形的高; A 为三角形与椭圆的一个交点; γ 为 A 点张成的角度。最终得到不同视线角下尾焰的投影面积为:

$$A_{pl} = \begin{cases} 0, & 0^\circ \leq \alpha < \alpha_1 \\ R(L \sin \gamma_1 \cos \alpha - R \gamma_1 \sin \alpha), & \alpha_1 \leq \alpha < 90^\circ \\ R_0 L, & \alpha = 90^\circ \\ \pi R_0^2 \sin \alpha + R_0 (L \sin \gamma_2 \cos \alpha - R_0 \gamma_2 \sin \alpha), & 90^\circ < \alpha \leq \alpha_2 \\ \pi R_0 L \sin \alpha \cos \alpha, & \alpha_2 < \alpha \leq 180^\circ \\ \pi R_0^2, & \alpha = 180^\circ \end{cases} \quad (14)$$

恒定值 γ_1 和 γ_2 满足式:

$$L \cos \alpha (R_0 - R \sin \gamma_1) = R_0 R \sin \alpha \cos \gamma_1 \quad (15)$$

$$L \cos \alpha (1 - \sin \gamma_2) = R_0 \sin \alpha \cos \gamma_2 \quad (16)$$

尾焰辐射与排出物有关, 它的主要成分是 CO_2 和 H_2O 。在中红外波段, CO_2 在 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 处产生两个峰值, H_2O 在 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 处产生一个峰值, 则对 $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 波段的红外探测器来说, 尾焰的主要辐射强度由 CO_2 决定, 而对于 $8\sim12\text{ }\mu\text{m}$ 的探测器来说, 尾焰辐射几乎可以忽略。

1.3 尾喷管红外辐射

尾喷管是被排出气体加热的短而粗的圆柱形腔体, 其发射率为 $0.8\sim0.9$, 长度与半径比一般为 $3:8$ 。不同视角时尾喷管的投影面积为:

$$A_{\text{hs}} = \pi R_{\text{hs}}^2 \cos \theta \cos \phi \quad (17)$$

且当 $\theta \notin (90^\circ, 270^\circ)$ 时, $A_{\text{hs}} = 0$ 。

1.4 总的红外辐射

以上分别分析了飞机蒙皮、尾焰和尾喷管的红外辐射, 飞机总的辐射可由三部分线性叠加得到。波段 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 内的红外辐射为:

$$I_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) (I_s + I_{\text{pl}} + I_{\text{hs}}) d\lambda \quad (18)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为大气透过率, 在下章进行详细描述。

2 大气透过率计算模型

红外辐射探测到的是经过大气衰减后的目标辐射强度, 因此需要考虑大气衰减对红外辐射的影响。一般来说, 红外辐射的大气衰减与下面几种因素有关: ①大气分子的吸收; ②大气分子、气溶胶、微粒等的散射; ③气象条件雨、雪等的衰减^[6]。用 $\tau_1(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$ 和 $\tau_3(\lambda)$ 分别表示吸收、散射和气象衰减的大气透过率, 则大气总的透过率为:

$$\tau(\lambda) = \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \tau_3(\lambda) \quad (19)$$

2.1 大气的吸收衰减

低层大气中对红外辐射起吸收作用的主要气体是水蒸气和 CO_2 气体, 其制约的大气透过率分别用 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和 $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 表示, 则综合吸收透过率 $\tau_1(\lambda)$ 为:

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \quad (20)$$

水蒸气在大气中的含量 w 满足:

$$w = f \cdot r \cdot R \quad (21)$$

式中: f 为温度 T 时饱和空气中的水蒸气质量; r 为相对湿度; R 为海平面水平路程。实验数据证明红外辐射通过水蒸气含量相等的路程时, 大气透过率近似相等^[4], 即满足:

$$\begin{cases} f_1 \cdot r_1 \cdot R_1 = f_2 \cdot r_2 \cdot R_2 \\ \mu_1 \cdot R_1 = \mu_2 \cdot R_2 \end{cases} \quad (22)$$

式中: μ_1 和 R_1 为气象条件1(温度 T_1 、水蒸气质量 f_1 、相对湿度 r_1)下的水蒸气吸收系数和通过的海平面水平路程; μ_2 和 R_2 为气象条件2(温度 T_2 、水蒸气质量 f_2 、相对湿度 r_2)下的水蒸气吸收系数和通过的海平面水平路程。由此可得水蒸气的大气透过率为:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = \exp\left(-\frac{r \cdot f}{6.76} \mu_{\text{H}_2\text{O}} R\right) \quad (23)$$

CO_2 在低层大气中的含量相对稳定, 可认为 CO_2 的吸收系数与气象条件无关。 CO_2 的大气透过率为:

$$\tau_{\text{CO}_2} = \exp(-\mu_{\text{CO}_2} R) \quad (24)$$

式(20)和式(21)中 $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 μ_{CO_2} 为大气温度 5°C , 相对湿度100%时海平面水平路径上二氧化碳和水蒸气的吸收系数, f 为温度为 T 时的水蒸气质量, 文献[7]给出了详细的数据表可供查询。

式(20)和式(21)只适用于海平面的水平路程, 实际的红外辐射传播路径通常为倾斜路径, 因此须将倾斜路径换算成等效的海平面水平路径。若倾斜路径为 S , 倾斜仰角为 θ , 传感器高度为 H_0 (km), 则等效的海平面水平路径^[4]:

$$R = \frac{e^{-\beta H_0}}{\beta \sin \theta} (1 - e^{-\beta \sin \theta \cdot S}) \quad (25)$$

式中: β 为常数: 水蒸气时, $\beta=0.0654$; 二氧化碳时, $\beta=0.19$ 。

2.2 大气的散射衰减

大气对红外辐射的散射衰减主要由大气中的分子、悬浮微粒和气溶胶等的散射造成, 主要有米散射和瑞利散射, 但对于红外波段, 瑞利散射的影响极小可基本忽略。可用气象视程来描述大气的散射衰减:

$$\tau_2(\lambda) = \exp\left(-\frac{3.19}{V_m} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \cdot R\right) \quad (26)$$

式中: V_m 为 $0.55\text{ }\mu\text{m}$ 时探测到的最大气象视程。 q 为与 V_m 有关的经验常数, 满足条件:

$$\begin{cases} q = 0.585 V_m^{1/3} & V_m < 6\text{ km} \\ q = 1.3 & 6\text{ km} \leq V_m < 80\text{ km} \\ q = 1.6 & V_m \geq 80\text{ km} \end{cases} \quad (27)$$

2.3 大气的气象衰减

主要考虑雨雪的气象衰减。雨、雪粒子的尺寸通常比红外波长大得多, 一般产生非选择的散射衰减,

可采用经验公式进行计算:

$$\tau_3(\lambda) = \exp[-R(0.66J_r^{0.66} + 6.5J_s^{0.7})] \quad (28)$$

式中: J_r 和 J_s 分别为与气象有关的降雨、降雪强度, 单位为 mm/h。

3 仿真结果

利用以上视线方向的飞机红外辐射特征模型, 以 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段为例, 计算了在俯仰角为 0° , 方位角 $0\sim360^\circ$ 下某飞机各组成部分及总的红外辐射, 如图 2 所示。

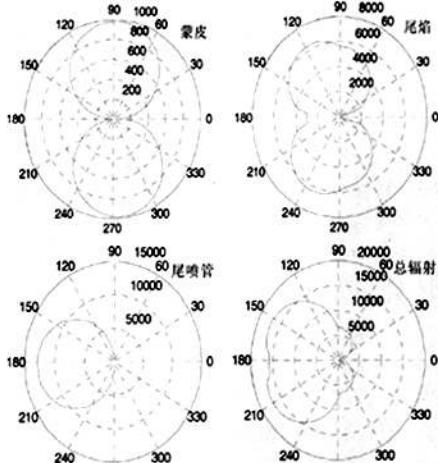


图 2 目标在 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的红外辐射(W/sr)

Fig.2 Infrared radiation of target in $3\sim5\mu\text{m}$ (W/sr)

可以看出, $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的红外辐射主要由尾喷管和尾焰产生, 尾喷管辐射只能从后方观测到。正前方和侧向探测时, 总辐射较小; 后向探测时总辐射较大。

若倾斜传输路径 8 km , 倾斜仰角 30° , 探测系统高度 6 km , 大气温度 25°C (由文献[7]可得水蒸气质量为 22.80), 相对湿度 70% , 最大气象视程 10 km 。气象条件 1 不考虑降雨和降雪的影响, 即降雨强度 0 mm/h , 降雪强度 0 mm/h ; 气象条件 2 考虑降雨降雪影响, 设置降雨强度 2 mm/h , 降雪强度 0 mm/h 。根据上文对大气衰减的分析, 对大气透过率进行了计算, 得到两种气象条件下 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的大气透过率。

通过计算得到两种气象条件下 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的平均透过率分别为 25.54% 和 0.14% , 见图 3 和图 4。根据飞机的红外辐射特征, 得到衰减后的红外辐射强度, 并得到气象条件 1 和气象条件 2 下经过衰减的飞机最大红外辐射强度分别 4367.8 W/sr 和 23.9426 W/sr 。而图 2 所示未经衰减的飞机最大红外辐射强度为 17102 W/sr 。

W/sr, 由此可知, 雨、雪是大气红外辐射衰减的主要因素。

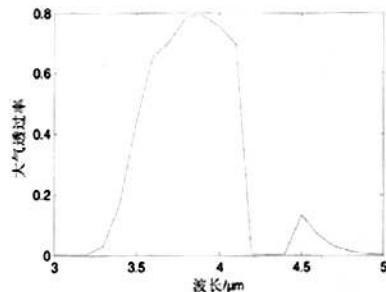


图 3 气象条件 1 下 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的大气透过率

Fig.3 Atmospheric transmittance in $3\sim5\mu\text{m}$ (Weather condition 1)

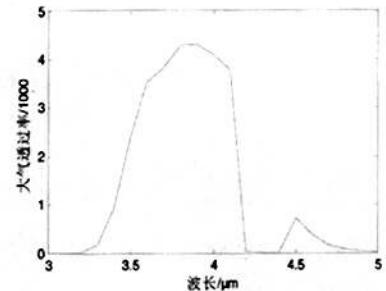


图 4 气象条件 2 下 $3\sim5\mu\text{m}$ 波段的大气透过率

Fig.4 Atmospheric transmittance in $3\sim5\mu\text{m}$ (Weather condition 2)

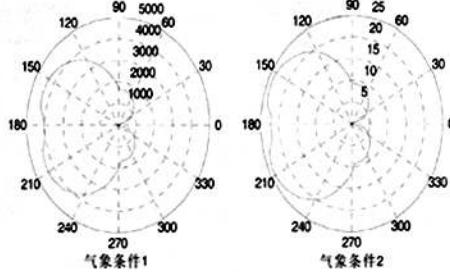


图 5 衰减后的红外辐射(W/sr)

Fig.5 Infrared radiation after attenuation(W/sr)

4 结语

本文详细分析了飞机的红外辐射特征, 建立了飞机红外辐射的计算模型, 利用该模型能对任意观察方向的飞机红外辐射进行计算。此外对红外辐射大气衰减的主要因素进行了简要分析, 提供了一种计算大气衰减的方法, 此法简便易行, 仅需查询少量相关的数据表, 便能对任意气象条件下的大气透过率进行计算。本文的模型和计算方法已在某项目中得到应用。

参考文献:

- [1] 窦晓牧, 岳晓奎, 罗建军. 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.
- [2] 毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 30(10): 1228-1232.
- [3] 王霞, 陈华灿. 视线方向上飞机红外特性计算方法[J]. 大气与环境光学报, 2008, 3(3): 217-222.
- [4] 陈波若. 红外系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [5] 毛峡, 董旭阳, 刁伟鹤. 巡航导弹红外辐射及大气衰减计算模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 952-955.
- [6] 周国辉, 刘湘伟, 徐伟伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.
- [7] 路远, 凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. 红外技术, 2003, 25(5): 45-50.

(上接第360页)

统的探测性能, 增大距离参量 b , 从而增加探测系统的作用距离。

5 结语

依据目标紫外辐射并结合背景紫外辐射的特点, 分析、推导得出了紫外探测系统作用距离方程, 并依据推导出的作用距离方程讨论了紫外探测系统作用距离的影响因素。通过查阅相关数据, 实例计算出了紫外探测系统的作用距离, 验证了作用距离模型的有效性, 为紫外探测系统的设计、研制、试验、性能评价及应用提供了理论依据, 对紫外探测系统的发展具有一定的现实作用。

参考文献:

- [1] 张建勇, 钟生东. 紫外线技术在军事工程技术中的应用[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 308-312.

- [2] 黄翌敏. 紫外探测技术应用[J]. 红外, 2005(4): 9-15.
- [3] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 王刚, 禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 276-280.
- [5] 王兵学, 张启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 8-11.
- [6] 吴晗平, 易新建, 杨坤涛. 红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 1-5.
- [7] 王兵学, 张启衡, 王敬儒, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 6-10.
- [8] 娄颖, 白廷柱. 紫外告警系统探测距离的估算[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 473-475
- [9] Neele F P, Schleijpen H M A. Electro-optical missile plume detection[C]//SPIE, 2003, 5075: 270-279.
- [10] 许强. 军用紫外探测技术及应用[M]. 北京: 北京航天大学出版社, 2010.