

# 背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究

徐顶国<sup>1</sup>, 桑建华<sup>1,2</sup>, 罗明东<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072; 2. 中航工业成都飞机设计研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**背景辐射特征是目标红外辐射的重要组成部分。以典型隐身无人机为对象,分析了背景对目标红外辐射的影响机理,建立了目标红外辐射的数学模型,计算了目标在背景辐射下的红外辐射特征,并分析了背景辐射对目标红外辐射特征的影响。该研究结果将为飞行器红外探测以及红外隐身设计提供参考。

**关键词:**背景辐射;无人机;数学模型;红外辐射

**中图分类号:**TN      **文献标识码:**A      **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.012

## Simulation study on the infrared radiation characteristics of UAV under the background radiation

XU Ding-guo<sup>1</sup>, SANG Jian-hua<sup>1,2</sup>, LUO Ming-dong<sup>2</sup>

(1. College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Background radiation characteristic is an important part of the target infrared radiation. For the typical stealth UAV, the effect of the background radiation on target infrared radiation was theoretically analyzed, and the mathematical model of the target infrared radiation was established. Using the numerical simulation method, the target infrared radiation characteristic under the background radiation was calculated, and the effect of background radiation on the target infrared radiation characteristics was analyzed. The results provide a reference for the aircraft infrared detection and infrared stealth design.

**Key words:** background radiation; UAV; mathematical model; infrared radiation

### 1 引言

近年来,随着红外制导武器的迅猛发展,对目标和背景红外辐射特征及背景辐射对目标红外辐射特征的影响研究越来越受到国内外的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。国内对背景及目标红外辐射特征的研究起步较晚,但是也取得了很大进展,例如,西电的李明柱、吴振森等人对复杂背景的光谱辐射特征进行了研究<sup>[4]</sup>,北航的吕建伟等人对飞行器蒙皮的红外辐射特征进行了研究<sup>[5]</sup>,南航的吉洪湖等人对飞行器排气系统的红外辐射特征进行了深入的研究并开发了红外计算软件<sup>[6]</sup>等。但是针对背景辐射下的飞行器红外辐射特征以及背景辐射对飞行器自身目标的红外辐射特征的影响的研究相对较少。本文针对典型隐身

无人机,研究了背景辐射对目标的红外辐射影响机理,建立了数学模型,利用离散传递法计算了该隐身无人机在3~5 μm和8~14 μm波段的红外辐射强度并分析了背景辐射对无人机红外辐射特征的影响。

### 2 计算模型

飞行器在空中巡航时,对外发射的红外辐射,包括自身的红外辐射以及它对入射辐射的反射两部分。其中,自身的红外辐射包括固体表面(蒙皮和喷管固体壁等)的红外辐射和喷流的红外辐射;反

作者简介:徐顶国(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为飞行器总体设计及隐身技术。E-mail: xudingguo2003@163.com

收稿日期:2012-10-27;修订日期:2012-11-19

射辐射包括固体表面对太阳入射辐射、大气入射辐射、地表入射辐射以及喷流和其他壁面入射辐射的反射,原理示意图如图1所示。

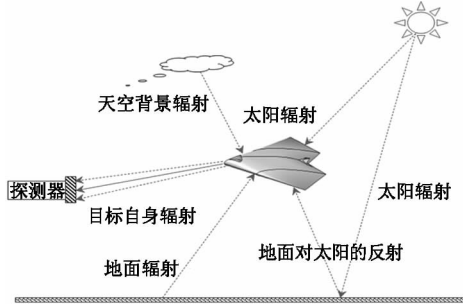


图1 飞行器红外辐射示意图

如果综合考虑喷流和空气的吸收作用,数学描述如公式(1)所示:

$$L_{\lambda} = L_{\lambda, \text{self}} + L_{\lambda, \text{ref}} = L_{\lambda, \text{wall}} \tau_{\lambda, \text{atm}} \tau_{\lambda, \text{plume}} + L_{\lambda, \text{plume}} \tau_{\lambda, \text{atm}} + (1 - \varepsilon_{\lambda})(H_{\lambda, \text{sun}} + H_{\lambda, \text{atm}} + H_{\lambda, \text{ground}} + H_{\lambda, \text{wall}} + H_{\lambda, \text{plume}}) \tau_{\lambda, \text{atm}} \tau_{\lambda, \text{plume}} / \pi \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_{\lambda}$  为材料表面的发射率;  $\tau_{\lambda, \text{atm}}$  为大气的透过率;  $\tau_{\lambda, \text{plume}}$  为喷流的透过率;  $L_{\lambda, \text{wall}}$  为固体表面的自身发射辐射亮度;  $L_{\lambda, \text{plume}}$  为喷流的自身辐射亮度, 单位为  $\text{W}/(\text{Sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ ;  $H_{\lambda, \text{sun}}$  为太阳入射辐射照度;  $H_{\lambda, \text{atm}}$  为大气入射辐射照度;  $H_{\lambda, \text{ground}}$  为地面入射辐射照度;  $H_{\lambda, \text{wall}}$  是固体壁面入射辐射照度;  $H_{\lambda, \text{plume}}$  为喷流入射辐射照度, 单位为  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

## 2.1 自身辐射

### 2.1.1 固体表面辐射亮度计算方程

当已知目标表面的温度分布时, 可根据普朗克定律及基尔霍夫定律求出目标任意波长的固体表面光谱辐射亮度  $L_{\lambda, \text{wall}}$  为:

$$L_{\lambda, \text{wall}} = \frac{\varepsilon_{\lambda}}{\pi} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{(c_2/\lambda T)} - 1]} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $\varepsilon_{\lambda}$  为材料表面的发射率;  $T$  为热力学温度 (K);  $c_1, c_2$  分别为第一、二辐射常量。

### 2.1.2 燃气辐射亮度计算方程

燃气辐射亮度计算方程描述了辐射能量在介质中沿着射线传输过程中能量的变化与吸收、发射和散射的相互关系, 是一个在射线传输方向上的能量平衡方程, 形式如下:

$$\underbrace{\frac{dL_{\lambda, \text{plume}}(S)}{dS}}_{(C)} = - \underbrace{\frac{\alpha_{\lambda} L_{\lambda}(S)}{(E_x)}}_{(E_x)} + \underbrace{\frac{\alpha_{\lambda} L_{\lambda b}(S)}{(E_m)}}_{(E_m)} - \underbrace{\frac{\sigma_{s\lambda} L_{\lambda}(S)}{(E_s)}}_{(E_s)} + \underbrace{\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{\omega_i=4\pi} L_{\lambda}(S, \omega_i) \Phi(\lambda, \omega, \omega_i) d\omega_i}_{(s)} \quad (3)$$

式中,  $L_{\lambda b}$  表示黑体的光谱辐射亮度;  $\alpha_{\lambda}, \alpha_{s\lambda}$  分别表示吸收系数和散射系数;  $\Phi(\lambda, \omega, \omega_i)$  为相函数。公式中各项的物理意义分别为:  $C$  为单位时间内、经过位于  $S$  处的单位面积、在  $\omega$  方向的单位立体角中传输的光谱能量经过单位距离的变化率;  $E_x$  为由于介质吸收引起的光谱能量的衰减;  $E_m$  为由于介质发射引起的光谱能量的增加;  $E_s$  为由于介质散射引起的光谱能量的衰减;  $s$  为由于空间各个方向投射在  $S$  处的能量的散射而引起的  $\omega$  方向上的光谱能量的增加。

## 2.2 反射辐射

(1) 太阳入射辐射照度表达式为:

$$H_{\lambda, \text{sun}} = \frac{8148 \cos \theta}{\lambda^5 [\exp(2.497/\lambda) - 1]} [1 - (1 - CA) \times CC^2] \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为太阳天顶角;  $CA$  为校正因子;  $CC^2$  为云的覆盖率<sup>[7]</sup>。

(2) 大气入射辐射照度表达式为:

$$H_{\lambda, \text{atm}} = \frac{3.7418 \times 10^8 (1 + A \cos \theta)}{\lambda^5 [\exp(14388/293\lambda) - 1]} (B_k + C_k \sqrt{E_a}) (1 + \text{CAR} \cdot CC^2) \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为太阳天顶角;  $B_k, C_k$  为经验常数, 通常取 0.61, 0.5;  $E_a$  为近地面气压 (hPa);  $\text{CAR}$  是与云的类型有关的系数;  $CC^2$  为云的覆盖率<sup>[7]</sup>。

(3) 地面入射辐射照度表达式为:

$$H_{\lambda, \text{ground}} = \frac{(1 - \rho_E)}{4} \frac{3.7418 \times 10^8}{\lambda^5 [\exp(14388/293\lambda) - 1]} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $\mu\text{m}$ ;  $\rho_E$  为地面反射率<sup>[7]</sup>。

(4) 固体壁表面入射辐射照度表达式为:

$$H_{\lambda, \text{wall}} = \int_0^{2\pi} (L_{\lambda, \text{wall}}(\omega) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) H_{\lambda, \text{wall}}(\omega)) d\omega \quad (7)$$

式中,  $H_{\lambda, \text{wall}}(\omega)$  为在  $\omega$  方向上的固体表面辐射亮度, 单位为  $\text{W}/(\text{Sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ ;  $H_{\lambda, \text{wall}}(\omega)$  表示在  $\omega$  方向上的固体壁面入射辐射照度, 单位为  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

(5) 喷流入射辐射照度表达式为:

$$H_{\lambda, \text{plume}} = \int_0^{2\pi} L_{\lambda, \text{plume}}(\omega) d\omega \quad (8)$$

式中,  $L_{\lambda, \text{plume}}(\omega)$  表示在  $\omega$  方向上的喷流辐射亮度, 单位为  $\text{W}/(\text{Sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

## 2.3 透过率

辐射通量通过大气时减弱的整个过程称为衰

减。根据朗伯-比耳定律可知,波长λ的辐射,经R厚度的大气透过率τλ,atm和喷流透过率τλ,plume分别为:

τλ,atm = e^{-∫βa(x,λ)·ρ(x)dx}, τλ,plume = e^{-∫βr(x,λ)·ρ'(x)dx} (9)

式中,a(x,λ)为大气的吸收截面;r(x,λ)为喷流的吸收截面;ρ(x),ρ'(x)为x处吸收分子浓度,单位为cm^{-3}。

3 几何模型和计算方法

3.1 几何模型

本文所研究的无人机为飞翼布局、背部进气、单发、高隐身无人作战飞机。全机长9.4 m,翼展长9 m,采用二元喷管(宽高比3:1喷口),喷管长2.4 m,喷管进口直径为0.6 m。全机几何外形如图2所示;简化二元喷管的半剖几何外形如图3所示。

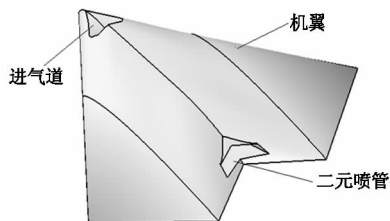


图2 典型无人机几何外形示意图

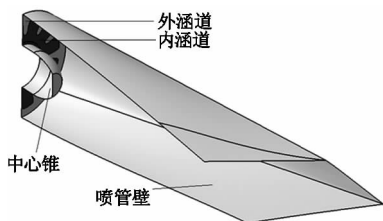


图3 二元喷管半剖几何外形示意图

3.2 计算方法

3.2.1 流场计算

流场计算的网格采用ICEM-CFD软件划分,采用非结构化网格;采用FLUENT软件进行流场的数值模拟计算,运用耦合显式求解器进行求解,湍流模拟采用RANS方程和SST K-ω两方程模型,喷管出口的浓度场的计算采用组分运输模型[7],方程组的解收敛的判别标准取残差小于1.0 × 10^{-3}。

流场计算状态为高空非加力状态,计算区域包括外流区域、全机区域、喷管区域以及喷流区域;计算过程中,模拟该无人机以攻角为4°、马赫数0.8的速度在海拔4456 m的高度巡航飞行工况;外流场边界设置为压力远场边界,涡扇出口截面及外涵截面设置为压力进口边界;给定涡轮发动机的涡轮出口截面的总压、总温及燃气内CO2, H2O和CO等参与辐射介质的摩尔浓度分数作为喷管内流动的计算

边界条件[8-9]。图4给出了固体壁面温度场计算结果图;图5给出无人机喷流计算结果图。

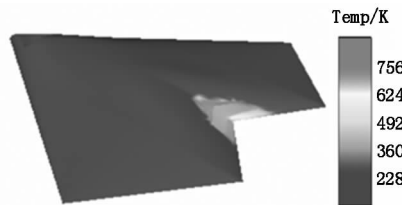


图4 无人机固体壁面温度场计算结果图

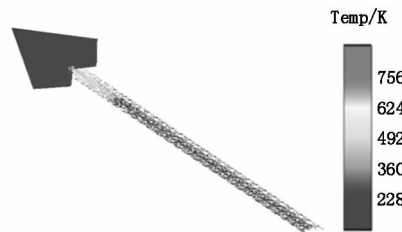


图5 无人机喷流温度计算结果图

3.2.2 红外计算

红外计算的面网格利用ICEM-CFD划分。对于带发动机的飞行器,采用离散传递法进行目标红外数值计算。计算过程可分为:①利用MODTRN计算出背景红外辐射照度;②计算固体壁面的光谱辐射亮度,包括其自身辐射以及对周围固体壁面的入射辐射的反射;③计算探测点所在微元面的入射辐射照度,首先将探测点对机身所张的立体角进行离散,微元立体角的中心线即为辐射线;然后对所有辐射线进行离散,计算入射到探测点的每条辐射线的光谱辐射亮度;最后将所有辐射线的光谱辐射亮度求和,即为探测点所在微元面的入射光谱辐射照度;④将探测点所在微元面的入射光谱辐射照度转化为机体在探测点所在方向的光谱辐射强度,并且将光谱辐射强度积分得到积分辐射强度。探测角度示意图如图6所示。

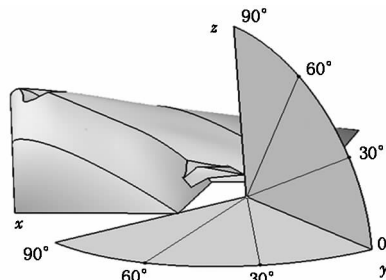


图6 探测角度示意图

3.3 可靠性验证

本文采用的离散传递法已经广泛应用于飞行器排气系统的红外数值计算,并在不考虑背景影响的条件下进行了校核。

为了考核该方法对背景影响计算的可靠性,本文计算了材料发射率为0.7、热力学温度为300 K的 $1\text{ m}^2$ 正方形平板在背景影响下的光谱辐射特征,并和理论值进行了比较。如图7所示,图中实线为理论值,三角符曲线为计算值。可以看出,计算得到的标准板红外辐射计算的误差在3%以内,满足工程需要。

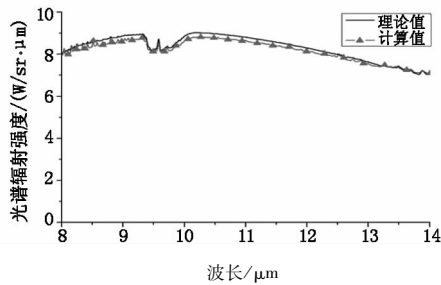
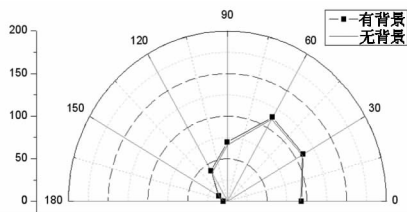


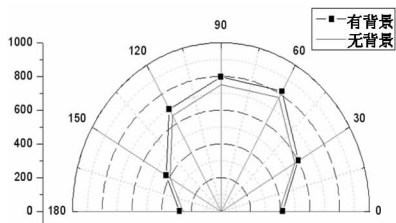
图7 平板在8~14  $\mu\text{m}$  波段光谱辐射强度分布

#### 4 计算结果分析

图8分别给出了典型隐身无人机在3~5  $\mu\text{m}$ 和8~14  $\mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度分布情况。



(a) 3~5  $\mu\text{m}$  总辐射强度分布



(b) 8~14  $\mu\text{m}$  总辐射强度分布

图8 无人机在3~5  $\mu\text{m}$ 和8~14  $\mu\text{m}$ 波段红外辐射强度分布

根据仿真计算得到的模拟结果,分析总结出典型隐身无人机红外辐射的规律和特点:

(1)从图8(a)可以看出,无人机在3~5  $\mu\text{m}$ 波段红外辐射强度在正前方 $180^\circ$ 方向最小,之后随着角度增加逐渐增加,在 $60^\circ$ 方向附近达到最大,然后随着角度的增加逐渐减小。原因是:在 $60^\circ$ 方向上高温内壁面被探测到,而在 $0^\circ$ 方位与喷管、喷流被遮挡有关。

(2)从图8(b)可以看出,无人机在8~14  $\mu\text{m}$ 波段红外辐射强度分布与图8(a)相似,即:在正前方 $180^\circ$ 辐射强度最小,随着方位角度的增加而增加,在 $180^\circ\sim 120^\circ$ 范围内红外辐射强度变化较快,

在 $120^\circ\sim 30^\circ$ 范围内红外辐射强度变化平稳。原因之一与机翼后掠角有一定关系,红外辐射强度在机翼前缘的法线方向上最大;原因之二与投影面积有关,在正前向红外辐射强度最低的原因是飞行器在该方向投影面积最小。对比发现:机身蒙皮在相应方位角上的红外辐射强度远远大于排气系统,原因是:虽然发动机喷管腔体的温度远高于机身蒙皮,但是其面积远小于蒙皮,且喷流内参与辐射介质( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}$ 等)在8~14  $\mu\text{m}$ 波段不存在较强的辐射发射带。

(3)背景辐射对目标的红外辐射有一定的影响,从图8可以看出,背景辐射对目标在8~14  $\mu\text{m}$ 波段的红外辐射贡献远远大于在3~5  $\mu\text{m}$ 波段的红外辐射。飞行器在8~14  $\mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度在方位探测角度为 $180^\circ$ 的正前方向的辐射最小,但背景辐射的贡献率却最大,约占10%;从图8(b)中可以看出,背景辐射分别在方位探测角度为 $150^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $0^\circ$ 上对目标的红外辐射贡献率约占8%, 6.6%, 6.1%, 5.3%, 4.4%, 5.2%。分析其主要原因与太阳天顶角(或太阳高度角)以及投影面积有关。结果说明:背景辐射在8~14  $\mu\text{m}$ 波段对目标的红外辐射具有较大影响,减小重要探测方位角上的背景辐射影响对减小飞行器的红外辐射强度具有重要意义。

#### 5 结论

本文分析了背景对目标红外辐射的影响机理,建立了可用于工程计算的数学模型;最后,利用数值模拟的方法计算了考虑背景辐射下无人机在3~5  $\mu\text{m}$ 和8~14  $\mu\text{m}$ 波段的红外辐射特征并分析了背景辐射对无人机的红外辐射特征的影响,得到如下几点结论:

(1)所建立的考虑背景辐射的目标红外辐射计算模型不仅快速有效,并且能够满足工程需求,对未来复杂背景下的目标红外辐射特征数值计算具有一定的实用价值;

(2)背景辐射在8~14  $\mu\text{m}$ 波段对目标的红外辐射具有一定的影响,太阳天顶角和投影面积是影响飞行器红外辐射的重要因素,减小背景辐射的影响对飞行路线的选择以及飞行器红外隐身设计都具有一定的指导意义;

(3)结合目标红外辐射数学模型,首次全面地对典型隐身无人机进行了内外流场计算与红外仿真计算。研究结果和方法可以为目标探测及红外隐身设计提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] Feng Yanhua, Yue Hui. Study on the characteristic of infrared radiation from the background of sea and sky[J]. Guidance & Fuze, 2010, 12(4): 39-44. (in Chinese)  
冯艳华, 岳慧. 海天背景红外辐射特性研究[J]. 制导与引导, 2010, 12(4): 39-44.
- [2] Song Xinbo. Study on the infrared stealth technology of plane[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 1-7. (in Chinese)  
宋新波. 飞机红外隐身技术研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 1-7.
- [3] Wang Jiangan. Study of infrared radiation feature of dim point-targets under complicated background of sea and sky[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(1): 48-50. (in Chinese)  
王江安. 海空复杂背景下弱点目标红外辐射特征研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(1): 48-50.
- [4] Li Mingzhu, Wu Zhenshen. Researches on the property of reflection and scattering of target by complex background light spectrum radiation[D]. Xi'an: Xi'dian University, 1999. (in Chinese)  
李明柱, 吴振森. 复杂目标对背景光谱辐射的反射/散射计算[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- [5] Lü Jianwei, Wang Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, (2): 232-237. (in Chinese)  
吕建伟, 王强. 飞行器蒙皮红外辐射特征的反向蒙特卡罗计算与分析方法[J]. 红外与激光工程, 2009, (2): 232-237.
- [6] Luo Mingdong, Ji Honghu, Huang Wei. Numerical evaluation on infrared radiant intensity of exhaust system of turbine engine without afterburning[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 609-616. (in Chinese)  
罗明东, 吉洪湖, 黄伟. 非加力涡轮发动机排气系统红外辐射强度的数值计算[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 609-616.
- [7] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- [8] Jin Jie, Zhu Gujun, Xu Nanrong, et al. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for aeroengine high-speed exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 582-585. (in Chinese)  
金捷, 朱谷君, 徐南荣, 等. 发动机高速排气系统红外辐射特性的数值计算和分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 582-585.
- [9] Wang Chaozhe, et al. Study on the airplane's infrared radiation characteristics[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 996-1001. (in Chinese)  
王超哲, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 996-1001.