

蒙皮反射的背景辐射对亚声速飞机红外特征的影响研究(一):方法

黄 伟,吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏省航空动力系统重点实验室,江苏 南京 210016)

摘 要: 基于 CFD 计算得到的流场、温度场结果和 Modtran 计算得到了环境辐射数据,建立了典型背景下的飞行器红外辐射特征计算模型。计算中考虑了波段、季节、发射率和双向反射函数等因素。通过地面试验数据,对计算方法进行了验证,计算值与试验数据吻合较好。该模型为更准确地分析飞行器的红外辐射特征,以及更合理地评价红外抑制措施的抑制效果提供了方法和工具。

关键词: 红外辐射; 飞机; 背景辐射; 双向反射分布函数

中图分类号: TN219; V218 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)06-1699-05

Effect of reflected background radiation by skin on infrared signature of subsonic aircraft (I): methodology

Huang Wei, Ji Honghu

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the flow field and temperature field results calculated by CFD code and the environment data calculated by Modtran, the calculation model of the infrared radiation signature of aircraft under typical background was established. The factors of the wave band, season, emissivity and bidirectional reflectance distribution function were calculated. The calculation method was verified through a ground test data, and the calculation data is in good agreement with the experimental data. This model can provide a method and tool for more accurate analysis of aircraft's infrared radiation signature and more reasonable evaluation of infrared suppression methods.

Key words: infrared radiation; aircraft; background radiation; BRDF

收稿日期: 2014-10-08; 修订日期: 2014-11-23

基金项目: 航空科学基金(20132752039)

作者简介: 黄伟(1983-),男,博士后,主要从事红外隐身方面的研究。Email:hw_one@163.com

0 引言

随着红外制导武器以及红外探测系统的迅猛发展,军用飞机甚至民航飞机的安全都受到了严重的威胁^[1]。出于隐身考虑,当前的飞机、直升机甚至导弹在设计的初始阶段就需要对其红外特征进行仿真分析,以降低其红外辐射^[2]。

近年来,研究人员侧重对飞机等空中目标的自身红外辐射以及采用隐身措施的红外抑制效果开展研究^[3-6],在研究中忽略了蒙皮反射的环境辐射对飞机红外特征的影响,并认为降低蒙皮发射率可获得显著的红外抑制效果。实际上,探测器接收到的辐射能量除了包括飞机的自身辐射外,还包括机身对周围环境背景辐射的反射辐射。关于背景辐射对空中目标红外辐射特征的影响也有相关研究^[7-8],但计算模型往往简化较大,忽略了较多的因素,如发动机排气系统热喷流辐射、发射率光谱特性、蒙皮的双向反射特性等等。

文中在综合考虑气动加热、发动机及排气喷流传热、壁面发射率光谱分布、波段和季节等因素的基础上,建立了考虑蒙皮反射背景辐射的飞行器红外辐射特征计算模型。该模型为更准确地分析飞行器的红外辐射特征,以及更合理地评价红外抑制措施的抑制效果提供了方法和工具。

1 计算方法

红外辐射特征计算通常分两步进行:(1) 根据飞行速度、高度等条件,进行飞行器的流场、温度场计算;(2) 将流场、温度场数据作为输入条件,计算探测器接收到的来自目标的红外辐射。

1.1 流场、温度场计算

飞机蒙皮、发动机壁面的温度场,以及热喷流的流场、温度场和组分浓度场采用 Fluent 软件计算,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,壁面考虑了对流-辐射耦合换热,辐射模型采用离散坐标辐射模型。计算域和边界条件如图 1 所示,外流进口采用压力远场边界,外流出口采用压力出口边界,内、外涵流道均采用压力进口边界。固体壁面均采用无滑移速度边界条件,内外流耦合的壁面设定为流-固耦合面。

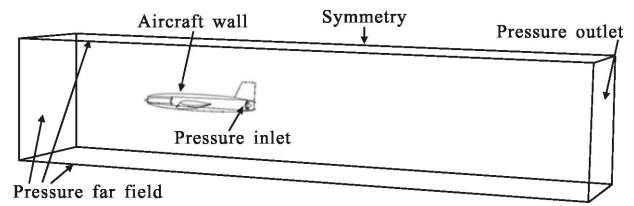


图 1 计算域和边界条件

Fig.1 Computation domain and boundary conditions

1.2 飞机总的红外辐射计算

考虑环境辐射的飞机总的红外光谱辐射强度如公式(1)所示:

$$I_{\text{total}, \lambda}(\mathbf{o}) = I_{ac, \lambda}(\mathbf{o}) + I_{\text{sun}, \lambda}^{\text{reflect}}(\mathbf{o}) + I_{\text{atmosphere}, \lambda}^{\text{reflect}}(\mathbf{o}) + I_{\text{ground}, \lambda}^{\text{reflect}}(\mathbf{o}) \quad (1)$$

式中: $I_{\text{total}, \lambda}$ 为飞机总红外辐射强度(量纲为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$), $I_{ac, \lambda}$ 为飞机自身红外辐射强度; $I_{\text{sun}, \lambda}^{\text{reflect}}$ 为反射的太阳红外辐射强度; $I_{\text{atmosphere}, \lambda}^{\text{reflect}}$ 为反射的大气红外辐射强度; $I_{\text{ground}, \lambda}^{\text{reflect}}$ 为反射的地面红外辐射强度; \mathbf{o} 为辐射方向或观测方向。

任意波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 之间的积分辐射强度 I_{total} 为:

$$I_{\text{total}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\text{total}, \lambda} d\lambda \quad (2)$$

1.2.1 飞机自身红外辐射

飞机自身红外辐射采用反向蒙特卡罗法计算,基本过程可见参考文献[9]。计算中考虑了 CO_2 和 H_2O 等两种燃气介质,并采用 HITEMP 数据库计算得到当地温度和压力下的吸收系数,光谱间隔为 10 cm^{-1} 。

计算中假设蒙皮材料为铝合金,表面涂覆常规涂层,发动机排气系统腔体材料为不锈钢,表面氧化,两种材料的法向光谱发射率如图 2 所示。由图可见,在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段,钢的发射率(平均值 0.79)明显大于蒙皮表面(平均值 0.61),在 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 波段,钢的发射率(平均值 0.51)明显小于蒙皮材料(平均值 0.87)。

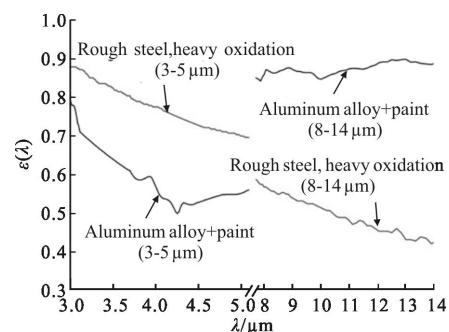


图 2 钢和蒙皮涂层表面的光谱发射率

Fig.2 Spectral emissivities of steel and skin paint

1.2.2 反射的太阳红外辐射

反射的太阳红外辐射计算式为:

$$I_{\text{sun},\lambda}^{\text{reflect}}(\mathbf{o}) = \text{BRDF}_{\lambda}(\mathbf{o}, \mathbf{i}) \cdot H_{\text{sun},\lambda} \cdot A_{\text{ac}}$$

$$H_{\text{sun},\lambda} = E_{\text{sun},\lambda} \cos \beta \quad (3)$$

式中:BRDF_λ为表面的双向反射分布函数;*i*为太阳辐射的入射方向;*H_{λ^{sun}}*为太阳对目标的直接辐射照度(量纲为W/(cm²·μm));*A_{ac}*为目标在探测视线方向上的投影面积;*E_{sun,λ}*为任意高度上某时刻的太阳直射照度,由Modtran软件计算得到;*β*为太阳辐射入射方向与蒙皮表面微元法向夹角。

文中采用Sandford-Robertson模型^[10]来模拟飞机表面对太阳的反射,见公式(4):

$$\text{BRDF}_{\lambda} = \frac{g(\theta_r, b)}{\pi} \frac{\rho_d g(\theta_r, b)}{[G(b)]^2} + \frac{1}{4\pi} (1 - \rho_d - \varepsilon)$$

$$\frac{g(\theta_r, b)}{G(b)} \frac{h(\alpha)}{H(\theta_r)} \frac{d(\theta_r)}{\cos(\theta_r)} \quad (4)$$

式中:*ρ_d*为漫反射系数;*ε*为发射率;*b*为掠角反射率;*e*为镜反射瓣宽。模型参数如表1所示。

表1 蒙皮材料的双向反射模型参数^[10]

Tab.1 BRDF parameters of skin

λ/μm	ρ _d	ε	b	e
4.44	0.410 8	0.563 0	0.119	0.250
10.0	0.102 5	0.885 6	0.119	0.249

计算中,假设当地经纬度为(N120°,W40°),夏季日期为6月23日,冬季日期为12月22日,时刻为正午12时。飞机由正南向正北飞行,太阳始终位于飞机的后上方。

蒙皮对入射太阳光线的散射分布如图3所示。由图可见,蒙皮对入射太阳光线的散射可分为漫反射分量和镜反射分量,镜反射分量主要分布在局部区域,且峰值明显大于漫反射分量。

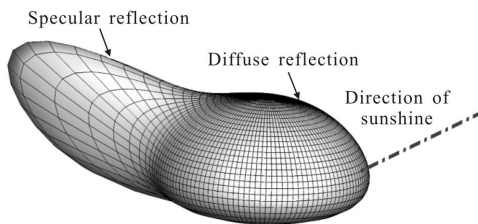


图3 蒙皮对入射太阳光线的散射分布

Fig.3 Distribution of scatter sun lights by skin

1.2.3 反射的大气红外辐射

反射的大气红外辐射计算式为:

$$I_{\text{atmosphere},\lambda}^{\text{reflect}}(\mathbf{o}) = \frac{1 - \varepsilon_{\lambda}}{\pi} H_{\text{atmosphere},\lambda} A_{\text{ac}}$$

$$H_{\text{atmosphere},\lambda} = \int_{n_w \cdot s_w < 0} L_{\text{atmosphere},\lambda}(\theta) |n_w \cdot s_w| d\omega_{\theta} \quad (5)$$

式中:*ε_λ*为壁面光谱发射率;*H_{atmosphere,λ}*为大气辐射对目标的照度;*n_w*为飞机壁面法向矢量;*dω_θ*为大气辐射照射方向*s_w*的立体角,sr;*θ*为天顶角,指高度*H*处,任意方向与地面法向的夹角,如图4所示;*L_{atmosphere,λ}(θ)*为任意高度*H*处,天顶角*θ*上的辐射亮度,由Modtran软件计算得到。

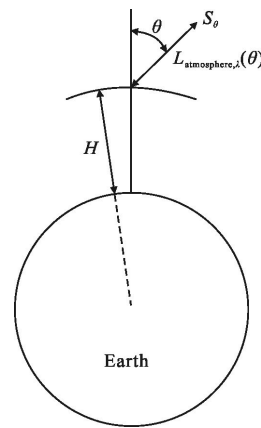


图4 天顶角θ示意图

Fig.4 Schematic diagram of zenith θ

11 km 高度处,两种气候条件下的大气红外辐射如图5所示。由图可见,飞机下方(例如θ=135°)夏季的大气辐射明显大于冬季,而飞机上方(例如θ=45°)的差别不大。还可以看出,8~14 μm 的大气辐射明显大于3~5 μm。

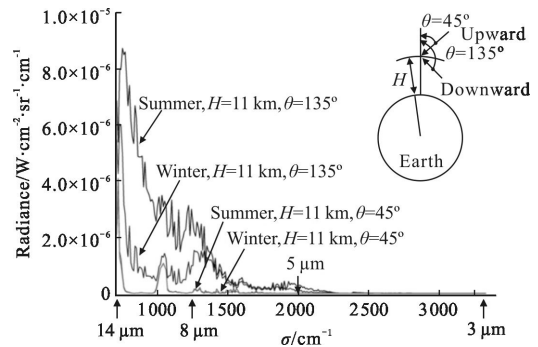


图5 大气红外辐射亮度随波长的分布

Fig.5 Distribution of infrared radiance of sky with wavelength

1.2.4 反射的地面红外辐射

反射的地面红外辐射计算式为:

$$I_{\text{ground},\lambda}^{\text{reflect}}(\theta) = \frac{1 - \varepsilon_{\lambda}}{\pi} H_{\text{atmosphere},\lambda} A_{\text{ac}}$$

$$H_{\text{atmosphere},\lambda} = \int_{n_w \cdot s_g < 0} \frac{\varepsilon_{\text{ground}}}{\pi} E_{b,\lambda}(T) \tau_{\text{parth},\lambda} |n_w \cdot s_g| d\omega_g \quad (6)$$

式中: $H_{\text{ground},\lambda}$ 为地面红外辐射对目标的照度; $E_{b,\lambda}$ 为黑体辐射力; $\tau_{\text{parth},\lambda}$ 为地面到飞机之间的大气透过率; $d\omega_g$ 为大气辐射照射方向 s_g 的立体角; T 为地面温度, 夏季时假设为 300 K, 冬季时假设为 273 K。

2 计算方法验证

采用发动机排气系统红外辐射模拟实验数据对自身红外辐射的计算方法进行了验证, 具体过程可见参考文献[9], 计算误差小于 10%, 满足工程计算需求。

以 Hermansson^[11] 的测试数据对蒙皮反射背景辐射的计算模型进行验证。试验中分别测试了刷暗绿色漆的金属板(发射率 0.8)和低发射率金属薄片(发射率 0.4)等两块平板的红外辐射亮度。验证结果如图 6 所示, 考虑了有太阳照射(下午 15 时)和无太阳照射(晚上 24 时)两种情况。计算中的太阳照度与试验时保持一致, 约为 510 W/m^2 左右。由图可见, 无论是否考虑太阳辐射, 计算值均在试验测试值的有效范围内, 计算结果与试验数据吻合较好。计算结果与实验结果均说明了表面反射背景辐射导致总辐射增加, 以及低发射率表面反射的背景辐射比高发射率表面强的现象。

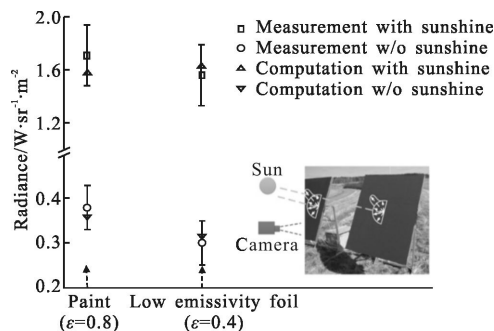


图 6 蒙皮反射背景辐射的试验验证

Fig.6 Validation of reflected background radiance by skin

3 结论

文中的第一部分建立了考虑自身红外辐射和蒙

皮反射大气、地面和太阳等三种背景辐射的飞行器红外辐射特征计算模型。计算中, 采用 CFD 方法计算得到的飞行器机体温度场和发动机排气系统的流场、温度场作为输入条件。为了提高红外辐射特征的模拟精度, 还采用了更为准确的壁面光谱发射率数据和双向反射分布函数数据。验证结果表明表面反射背景辐射导致总辐射增加, 计算值与试验数据吻合较好。文中的第二部分将采用该模型计算分析背景辐射对亚声速飞机红外辐射特征的影响, 从而更合理地评价红外抑制措施的抑制效果。

参考文献:

- [1] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, 43: 218-245.
- [2] Coiro E. Global illumination technique for aircraft infrared signature calculations [J]. *Journal of Aircraft*, 2013, 50(1): 103-113.
- [3] LÜ J, Wang Q. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(5): 493-497.
- [4] Lin Jie, Jiang Yong, Fang Haobai, et al. Modeling and analysis on self-infrared radiation characteristics of whole aircraft skin [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34 (5): 286-291. (in Chinese)
林杰, 江勇, 方浩百, 等. 飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J]. 红外技术, 2012, 34(5): 286-291.
- [5] Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Study on the infrared radiation characteristics of UAVS' skin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 880-884. (in Chinese)
徐顶国, 桑建华, 罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 880-884.
- [6] Liu Jian, Gong Yu, Ji Honghu. Fighter's infrared characteristics between 8 and 14 μm and infrared stealth effect of low emissivity materials [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(2): 259-267. (in Chinese)
刘健, 宫禹, 吉洪湖. 战斗机 8~14 μm 波段红外特征及低发射率材料隐身效果[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 259-267.
- [7] Fan Hongjie, Liu Lianwei, Xu Zhenling, et al. The engineering arithmetic of the reflected infrared radiation characteristic for air-target [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(5): 289-294. (in Chinese)
樊宏杰, 刘连伟, 许振领, 等. 空中目标反射辐射特性工程

- 算法[J]. 红外技术, 2013, 35(5): 289-294.
- [8] Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Simulation study on the infrared radiation characteristics of UAV under the background radiation [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 649-653. (in Chinese)
徐顶国, 桑建华, 罗明东. 背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 649-653.
- [9] Huang Wei, Ji Honghu, Si Ren, et al. Infrared characteristics calculating of turbofan engine exhaust system[J]. *Journal of Propulsion Technoloty*, 2010, 31(6): 746-750. (in Chinese)
黄伟, 吉洪湖, 斯仁, 等. 涡扇发动机排气系统红外特征[J]. 推进技术, 2010, 31(6): 746-750.
- [10] Jafolla J, Thomas D, Hilgers J. A comparison of BRDF representations and their effect on signatures [R]. ADA399506, 1998.
- [11] Hermansson P, Hjelm A, Lindell R. Benchmarking and validation of IR signature programs: SensorVision, CameoSim and RadThermIR[R]. FOI-R-0952-SE, 2003.