环境辐射对亚声速飞行器红外特征影响 的数值仿真研究

李伟,黄伟*,宫禹

航空工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

摘 要:为了研究复杂环境对典型亚声速飞行器红外辐射特征的影响,本文建立了考虑环境辐射的飞行器红外特征反向蒙 特卡罗计算模型。以X450 无人机为对象,分析了其亚声速飞行状态下红外辐射强度的空间分布规律以及飞机红外辐射与环 境背景的对比特征。结果表明,亚声速飞行状态下,环境背景对飞机下表面辐射亮度的影响大于飞机上表面,飞机的红外 辐射特征与背景的对比随探测方向存在明显差异。

关键词:红外辐射,环境,仿真,发射率

中图分类号: V218; TN215 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.07.048

红外探测系统利用目标红外辐射特性与背景环境特征 的差异来探测和识别目标,随着探测元件性能大幅提升,探 测距离越来越远、探测精度越来越高,对军用飞行器的安全 造成了严重的威胁。飞行器红外辐射特征包括自身辐射及 反射背景辐射两部分,降低蒙皮表面发射率会增加对于环境 辐射的反射,隐身飞机通过调节自身发射/反射特性,使自 身辐射与反射辐射二者之和最小,减小与背景辐射差异,降 低被红外搜索跟踪及红外制导导弹发现、跟踪的概率,提升 战场生存力。

数值仿真是红外隐身设计中的重要手段,西方军事强 国早在 20 世纪 60 年代就开展了飞行器红外辐射特征数值 仿真研究,早期的研究中只关注飞行器自身辐射特征。随 着研究的深入,大量计算和试验数据表明环境辐射对于飞 行器红外辐射特征的影响不可忽略,尤其是对红外隐身材 料应用方案产生了重要影响^[1,2]。目前,国际上比较成熟的 飞机目标红外辐射特性仿真软件如 NIRATAM^[3]、SIRUS^[4]、 MuSES、SMIR^[5]、SE-WORKBENCH-IR^[6] 均考虑了环境对 于飞行器红外辐射特性的影响。

国内对飞机红外辐射特征进行研究大约起始于 20 世 纪 90 年代。近年来,国内研究人员对飞机的红外辐射特征 开展了大量研究^[7-12],但对于复杂环境下飞机红外辐射特征 以及红外隐身方案的影响研究则刚刚起步,亟须深入开展研究。本文建立了复杂环境下飞行器红外特征仿真方法,并以 X45C飞机为研究对象,研究了环境红外辐射对典型飞行状态下飞机 8~14μm 波段红外辐射特征的影响,研究结果可为 飞机红外隐身设计提供参考。

1 计算方法

1.1 复杂环境下飞行器红外特征仿真模型

相关研究表明,如太阳、大气、陆地和海洋等环境辐射照 到飞行器表面上,经反射后会进入探测系统。因此,飞行器红 外辐射特征包含自身辐射信号和对环境辐射的反射两部分。 本文所建立的红外特征仿真模型如图1所示,包括A目标自 身的辐射、B蒙皮反射地物辐射、C蒙皮反射太阳辐射、D蒙 皮反射大气辐射和E大气沿程辐射(大气自身热辐射)。



图 1 飞行器红外辐射特征组成 Fig.1 The compositions of aircraft infrared characteristic

收稿日期:2018-02-28; 退修日期:2018-03-11; 录用日期:2018-06-25 基金项目:航空科学基金(2016ZA01004)

*通信作者.Tel.: 13813392010 E-mail: hw_one@163.com

引用格式: Li Wei, Huang Wei, Gong Yu. Numerical investigation of effect of environmental radiation on the infrared radiation signature of subsonic aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (07): 48-52. 李伟,黄伟,宫禹. 环境辐射对 亚声速飞行器红外特征影响的数值仿真研究 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (07): 48-52. 飞行器自身辐射可以根据蒙皮发射率和普朗克定律建 立,环境辐射及大气采用 Modtran 软件建立,壁面的反射特 性*f_{r,λ}*采用模型化的壁面双向反射分布函数 (BRDF) 来模 拟,其光谱辐射亮度如式 (1) 所示:

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \left[\underbrace{\frac{A}{\varepsilon_{\lambda} L_{\text{self}} \cdot_{\lambda}(T)}}_{\left(F\right)} + \underbrace{f_{r,\lambda}\left(E_{\text{earth},\lambda} + E_{\text{sun},\lambda} + E_{\text{atmo},\lambda}\right)}_{\left(1\right)} \right] + \underbrace{\frac{E}{L_{\text{path},\lambda}}}_{\left(1\right)}$$

式中: τ_{λ} 为沿程衰减系数, $\varepsilon_{\lambda}L_{\text{self},\lambda}(T)$ 为飞行器自身辐射亮度, $f_{r,\lambda}$ 为蒙皮的双向反射函数, $E_{\text{earth},\lambda}$ 为地球的辐射照度, $E_{\text{sun},\lambda}$ 为太阳辐射照度, $E_{\text{atmo},\lambda}$ 为大气辐射照度, $L_{\text{path},\lambda}$ 为大气铅射照度, $L_{\text{path},\lambda}$ 为大气铅程辐射亮度。对谱带亮度 L_{λ} 在波段和面积上进行积分,可得到辐射强度。

1.2 数值求解过程

采用反向蒙特卡罗法 (Reverse Monte Carlo, RMC) 对 飞行器红外辐射特性进行求解。具体基本过程为:(1) 采用 CFD 商业软件计算飞机蒙皮、发动机壁面的温度场分布,发 动机热喷流的温度、压力和组分浓度场分布;(2) 对在探测 器的视场 (FOV) 进行像素化划分,每个像素内从探测器向 目标发射 N 条射线;(3) 根据壁面的吸收一反射特性和燃气 的吸收一透射特性统计每条射线的归属,如果射线被壁面或 燃气吸收,表示吸收点处有自身辐射能量沿着该射线方向的 反方向进入探测器镜头,如果射线被壁面反射而进入环境背 景或者直接进入环境背景,则表示环境辐射能量沿着该射线 反向到达探测表面;(4) 根据照度和强度方程计算视场内所 有的辐射单元总的辐射强度。具体原理如图 2 所示。



1.3 自身辐射求解

飞行器自身辐射分为固体壁面辐射和燃气辐射。

(1) 固体壁面辐射

飞行器固体壁面辐射根据普朗克定律及基尔霍夫定律 求解。蒙皮自身辐射亮度计算公式为:

 $L_{\text{self},\lambda}(T) = E_{b\lambda}(T)/\pi$ (2)

(2) 燃气辐射

高温燃气中 CO2 和 H2O 等参与性介质在一定的波长范

围内具有吸收和发射红外辐射能力,采用统计窄带模型计算 燃气辐射。CO₂和H₂O的吸收系数根据 HITEMP 数据库进 行插值计算得到。

1.4 反射环境辐射求解

本文在数值仿真过程中考虑了太阳、地球、大气以及 大气沿程辐射的影响,使用标准的商业软件 Modtran 计算 建模。

(1) 太阳辐射

太阳外表温度近似为 5900K,等效黑体辐射温度为 5770K。本文采用 Sandford-Robertson 模型来模拟飞机表面 对太阳的反射,材料的双向反射函数如式 (3) 所示:

$$f_{r,\lambda} = \frac{g(\theta_o, b)}{\pi} \frac{\rho_{d,\lambda} g(\theta_i, b)}{[G(b)]^2} + \frac{\left(1 - \rho_{d,\lambda} - \varepsilon_{\lambda}\right) g(\theta_i, b)}{4\pi} \frac{h(\alpha)}{G(b)} \frac{h(\alpha)}{H(\theta_i)} \frac{1}{\cos(\theta_o)} d(\theta_o)$$
(3)

式中: $\rho_{d,\lambda}$ 为光谱漫反射系数, ε_{λ} 为光谱发射率, b 为掠角反 射率, e 为镜反射宽度。计算飞机对太阳辐射的反射时, 需 要考虑日期、时刻、目标的位置以及表面的双向反射函数类 型等因素。达到表面的入射照度为:

$$E_{\text{earth},\lambda} = F \cdot E_{\text{direct},\lambda} \cos(\theta_s) \tag{4}$$

式中: F 为太阳射线与蒙皮表面的可见因子, θ_s 为太阳射线 与壁面法向夹角。

(2) 大气辐射

环境中的大气可以假设为由许多层气体层组成,每一层 中吸收、发射以及穿透的红外辐射能量取决于各层的组分、温 度、压力以及空间位置。各层的大气温度、压力和组分浓度随 高度的升高而降低,为了便于进行计算研究,可以确定一些典 型的气候条件。采用 Modtran 程序计算得到的选定季节时, H高度处的大气红外辐射亮度随照射方向 s₀ 的分布。

大气辐射对目标的光谱辐射照度可表示为:

$$E_{\text{atmo},\lambda} = \int_{\boldsymbol{n}_{w},\boldsymbol{s}_{\theta}<0} L_{\text{atmo},\lambda}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{n}_{w} \cdot \boldsymbol{s}_{\theta} | d\boldsymbol{\omega}_{\theta}$$
(5)

式中: $L_{\text{atmos},\lambda}$ 为目标四周任意方向上的大气辐射亮度,单位 为 W/(sr·cm²·µm); n_w 为飞机壁面法向矢量; $d\omega_\theta$ 为大气 辐射照射方向 s_θ 的立体角。

(3) 地面辐射

假设地面为一个发射率为 0.95 的灰体,向上方发射辐射的方向为 s_e,照射到飞机表面上的光谱辐射照射为:

$$E_{\text{earth},\lambda} = \int_{\boldsymbol{n}_{w} \cdot \boldsymbol{s}_{g} < 0} \frac{E_{b,\lambda}(\boldsymbol{T}_{\text{earth}})}{\pi} \boldsymbol{\tau}_{\lambda} | \boldsymbol{n}_{w} \cdot \boldsymbol{s}_{g} | \mathbf{d}\boldsymbol{\omega}_{g}$$
(6)

式中: τ_{λ} 为地面到飞机之间的大气透过率; T_{earth} 为地面温度; $d\omega_{g}$ 为大气辐射照射方向 s_{g} 的立体角。

(4) 大气沿程辐射

大气沿程辐射指选定大气条件、高度和距离情况下视 线上的大气热辐射及散射辐射之和。单一光谱大气程辐射 模型为:

$$L_{\text{path},\lambda} = L_{\text{ss},\lambda} + L_{\text{mss},\lambda} + L_{\text{atm},\lambda}$$
(7)

式中: $L_{ss,\lambda}$ 为大气对太阳辐射的单次散射, $L_{ms,\lambda}$ 为大气对太阳辐射的多次散射, $L_{atm,\lambda}$ 为传输路径大气自身热辐射。

2 计算模型及条件

2.1 计算模型

本文以美国 X45C 无人机为计算对象,机体外形如图 3 所示。该动力装置为通用电气公司的 F404-GE-0102D 发 动机,进气道和喷管都进行了隐身设计。



图 3 仿真模型 Fig.3 Simulation model

2.2 流场计算

利用 Fluent 软件计算流场分布。湍流模型采用 SST k— ω 模型,考虑了对流一辐射换热,流场边界采用压力远场,发动 机内外涵道均采用质量流量进口边界,固体壁面采用无滑移 速度边界条件。计算中采用结构化网格对流场和固体壁面进 行划分,如图 4 所示。在近壁面区域和高温尾焰区域进行网 格加密处理并经过独立性验证,网格总数约为 568 万。



图 4 网格划分 Fig.4 Simulation mesh

本文计算了一种飞行状态下的流场分布,计算边界条 件见表1。

2.3 红外辐射计算

计算红外辐射时,飞机壁面采用三角形网格,网格单元 内包含了坐标、矢量方向、温度、发射率等信息。计算过程中 采用圆锥坐标系、以飞行器重心为原点进行扫描,飞机相对探 测器俯仰角度为负时主要探测下表面飞机红外辐射特性,飞 机相对探测器俯仰角度为正时主要探测上表面飞机红外辐射 特性。本文分别计算了方位0°~180°(0°为飞机正前向),飞机 相对探测器俯仰10°、-10°、0°,两种红外隐身方案高空亚声速 巡航飞行状态下的红外辐射特性,两种隐身方案见表2。

表 1 仿真边界条件 Table 1 Simulation boundary conditions

	计算工况	
高度 /km	11	
速度 /km	0.8	
内涵	流量 12.5kg/s; 总温 850K	
外涵	流量 20kg/s, 总温 360K	

表 2 红外仿真状态 Table 2 Infrared simulation condition

	发射率状态		
	机身蒙皮	发动机内高温壁面	
方案1	低发射率	低发射率	
方案2	上表面低发射率 下表面高发射率	低发射率	

仿真过程中环境模型采用 1976 年美国标准大气模型, 不考虑云和雨的影响,地表温度设为 15℃,太阳从飞行器前 方 45°天顶角入射。

3 计算结果

3.1 流场计算结果

温度场仿真结果如图 5 所示。受气动热影响,飞行 器蒙皮温度约为 240K 左右。发动机内涵出口温度约为 850K,内部喷管壁面温度约为 650K,发动机尾焰核心区温 度约为 550K 左右。



Fig.5 Simulation result of temperature

3.2 红外辐射计算结果

3.2.1 红外辐射强度空间分布

8~14μm 波段红外亮度成像仿真结果如图 6 所示。无 环境辐射计算得到的是自身红外辐射,而考虑环境辐射计算 得到的是自身红外辐射和反射环境辐射之和。从方案 1 的 结果来看,当不考虑环境辐射时,降低飞机表面的发射率后, 除了进气道之外的其他部位亮度明显降低,当考虑环境辐射时,下表面的亮度明显比上表面高。从方案2的结果来看,虽然不考虑环境时下表面亮度较高,但考虑环境辐射后下表面的亮度明显比方案1的低。





俯仰探测面内的红外辐射强度分布如图 7 所示。对于 方案 1,水平探测(0°)的辐射强度最低,下方探测面(-10°) 的辐射强度最高,上方探测面(10°)介于两者之间。对于方 案 2,水平探测(0°)和下方探测面(-10°)的辐射强度都比 方案 1 明显降低,上方探测面(10°)与方案 1 几乎相同。



图 7 俯仰探测面内的红外辐射强度分布 Fig.7 Distribution of infrared radiation intensity in pitch detection plane

3.2.2 蒙皮反射的环境辐射分析

各方位角上蒙皮反射的环境辐射与总辐射之比如图 8 所示。可见,对于方案 1,前向及侧向的反射背景辐射占总 辐射的比例高达 70% 以上,其中下方探测面的比例最高, 约为 88%。对于方案 2,各个探测面的反射比例均比方案 1 低,此时上方探测面的比例最高,约为 75%,下方探测面的 比例最低,约为 27%,水平探测面的比例约为 45%。

4 结论

本文分析了复杂环境对 11km 高度亚声速飞机 8~14µm 波段红外辐射特征的影响,通过分析,可以得出以下结论:

(1)由于环境辐射的存在,反射背景辐射导致飞机表面 的红外辐射亮度增加,且对下表面辐射亮度的影响程度高于 上表面。飞机下表面采用高发射率时的红外辐射亮度比采 用低发射率时更低,可探测的红外辐射强度也更低。



图 8 各方位角上蒙皮反射的环境辐射对比 Fig.8 Reflection background radiation contrast on each azimuth

(2)亚声速飞行状态下,降低飞机上表面的发射率,增加下表面的发射率有利于降低飞机反射的环境辐射强度。 降低整机低发射率时,前向及侧向的反射背景辐射占总辐射 的比例高达 70% 以上,而仅降低上表面的发射率时,反射比 例可降至 27%~45%。

参考文献

 [1] 黄伟,吉洪湖,卢浩浩.大气及地面辐射对高空飞机长波低 发射率红外隐身效果的影响[J]. 航空动力学报,2016,31
 (2):350-359.

Huang Wei, Ji Honghu, Lu Haohao. Impact of atmospheric and ground infrared radiation on infrared stealth effect of longwave band low emissivity of high-flying aircraft[J].Journal of Aerospace Power, 2016, 31 (2): 350–359. (in Chinese)

- [2] Huang Wei, Ji Honghu. Effect of environmental radiation on the long-wave infrared signature of cruise aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 56: 125–134.
- [3] Cliord L B. Integrated design of fighters with stores for best aeroforce value[J]. Aerospace Science, 1997, 33: 709–730.
- [4] Veiga I V. IR signature modeling at BAE systems ATC[C]// International Target and Background Modeling and Simulation Workshop, 2011: 1–26.
- [5] Jim C, Denny B, Karen K, et al. F/A-22 IR signature flight test

model validation [J]. Aircraft Survivability, 2003, 4 (2): 9-11.

- [6] Cathala T, Douchin N, Joly A, et al. The use of SE-workbench for aircraft infrared signature, taken into account body, engine, and plume contributions[C]//Proceedings of SPIE, 2010.
- [7] 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.
 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)
- [8] 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.
 Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Study on the infrared radiation characteristis of UAVs skin[J].Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (4): 880-884. (in Chinese)
- [9] 刘健, 宫禹, 吉洪湖. 战斗机 8~14mm 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.
 Liu Jian, Gong Yu, Ji Honghu. Fighter's infrared charateristics between 8 and 14mm and infrared stealth effect of low emissivity materials[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29 (2): 259-267. (in Chinese)
- [10] 王杏涛,张靖周,单勇.飞行器 8~14mm 波段红外特征的数 值研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (1):6-12.

Wang Xingtao, Zhang Jingzhou, Shan Yong. Numerial investigation of aircraft infrared charateristics in 8~14mm band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (1) : 6-12. (in Chinese)

- [11] 李慎波, 童中翔, 王超哲, 等. 飞机机体红外辐射特性研究
 [J]. 激光与红外, 2014, 44 (7): 739-744.
 Li Shenbo, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Study on the infrared radiation charateristics of the aircraft airframe[J].
 Laser & Infrared, 2014, 44 (7): 739-744. (in Chinese)
- [12] 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.
 Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Simulation study on the infrared radiation charateristics of UAV under the background radiation[J].Laser & Infrared, 2013, 43 (6): 649-653. (in Chinese)

作者简介

李伟(1987-) 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机及发 动机红外隐身设计。 黄伟(1983-) 男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机 及发动机隐身设计。 Tel:13813392010 E-mail: hw one@163.com

Numerical Investigation of Effect of Environmental Radiation on the Infrared Radiation Signature of Subsonic Aircraft

Li Wei, Huang Wei*, Gong Yu

AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China

Abstract: In order to study the effect of complex environment on the infrared radiation signature of subsonic aircraft, a reverse Monte Carlo calculation model for aircraft infrared radiation signature with environmental radiation was established. For a X45C, the spatial distribution of infrared radiation intensity and the infrared contrast between the aircraft and the environment was calculated. The results show that, the influence of environment on the radiance of subsonic aircraft's lower surface is greater than that on the upper surface, the infrared contrast between the aircraft and environment varies significantly with the detection direction.

Key Words: infrared radiation; environment; simulation; emissivity

Received: 2018–02–28; Revised: 2018–03–11; Accepted: 2018–06–25 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZA01004) *Corresponding author.Tel.: 13813392010 E-mail: hw_one@163.com