

文章编号:1001-5078(2025)04-0579-09

· 红外技术及应用 ·

## 基于 PRISM 的隐身飞机红外辐射特性研究

王明章,李永强,卫临方,刘德连,黄曦,马向超,李想,丁国鹏

(西安电子科技大学 光电工程学院,陕西 西安 710071)

**摘要:**作为现代战争中首屈一指的制空武器,隐身飞机具备优异的气动性能和极高的战场隐蔽能力,其探测识别技术是现代光电领域的重要研究内容。尽管隐身设计能够显著抑制目标电磁特征信号,但由于高速飞行时蒙皮气动热效应、羽流未遮挡部分仍具有可观的红外辐射水平,这为隐身飞机的红外探测提供了关键依据。本文面向现代复杂电磁环境中光电对抗技术需求,开展隐身飞机红外辐射特性计算及仿真研究,基于自主化的物理可信光电场景仿真系统 PRISM,对典型隐身飞机进行几何建模、蒙皮温度场计算、羽流物理场计算,获得目标零视距红外辐射特性;结合大气辐射传输效应分析,计算得到探测距离为 20 km 处的目标红外辐射特性。计算结果表明:1)在不同红外探测波段下,目标前向、后向辐射强度极小值分别位于 0°、180°探测幅角方向;2)在目标非加力飞行状态下,采用长波 8~12  $\mu\text{m}$  探测获得的目标辐射强度高于中波探测的结果;在 0°探测幅角方向,长波红外辐射强度高于中波约 140 W/Sr;3)在目标加力飞行状态下,尾向探测时,采用中波 3~5  $\mu\text{m}$  探测获得的目标辐射强度显著高于长波探测的结果;在 0°探测幅角方向,长波红外辐射强度高于中波约 400 W/Sr;4)加力飞行状态下的蒙皮气动热效应更为显著,在 0°探测幅角方向,长波红外辐射强度较非加力状态提升约 330 W/Sr。仿真结果表明,采用中波 3~5  $\mu\text{m}$ 、长波 8~12  $\mu\text{m}$  探测波段,PRISM 系统对于不同飞行状态下的隐身飞机目标均具有良好的红外成像仿真能力,可支撑五代隐身飞机的红外探测及光电对抗研究。

**关键词:**隐身飞机;蒙皮;羽流;红外辐射特性

**中图分类号:**TN219;O432 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.015

## Study on infrared radiation characteristics of stealth aircraft based on PRISM

WANG Ming-zhang, LI Yong-qiang, WEI Lin-fang, LIU De-lian,

HUANG Xi, MA Xiang-chao, LI Xiang, DING Guo-peng

(School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** As the leading air control weapon in modern warfare, stealth aircraft has excellent ability of aerodynamic performance and extremely high battlefield concealment. Nevertheless, the aerodynamic thermal effect of aircraft skin and the unshielded part of exhaust plume still have a considerable infrared radiation level with the stealth aircraft moving at high speed, which provides an important basis for the infrared detection of the stealth aircraft. In this paper, the

**基金项目:**中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. ZYTS25280);国家自然科学基金项目(No. 62274124);西安市飞行器光学成像与测量技术重点实验室基金项目(No. 2023-005)资助。

**作者简介:**王明章(2000-),硕士研究生,主要从事目标红外辐射特性等方面的研究。

**通讯作者:**卫临方(1995-),男,博士,讲师,主要从事计算成像、光电系统仿真等方面的研究。E-mail:weilinfang@xidian.edu.cn

**收稿日期:**2025-01-23; **修订日期:**2025-03-12

infrared radiation characteristics of stealth aircraft are studied for the photoelectric countermeasure technology in modern complex battlefield. Based on the in-house developed physically-reasonable photoelectric simulation system PRISM, the typical stealth aircraft geometric modeling, the skin temperature field calculation, and the exhaust plume physical field calculation are performed to obtain the zero line-of-sight radiation characteristics of the target. Combined with analysis of the atmospheric radiance transfer effect, the infrared radiation characteristics of the target at the detection distance of 20 km are calculated. The calculation results show that: 1) Using different infrared detection bands, the minimum values of the forward and backward radiation intensities of the target are located at the detection azimuth angles of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ , respectively; 2) At the non-afterburning flight state, the target radiation intensity obtained by long-wave  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  detection is higher than that of mid-wave detection; at the detection azimuth angle of  $0^\circ$ , the long-wave infrared radiation intensity is approximately  $140 \text{ W/Sr}$  higher than that of mid-wave; 3) At the afterburning flight state, while detecting from the tail direction, the target radiation intensity obtained by mid-wave  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  detection is significantly higher than that of long-wave detection; at the detection azimuth angle of  $0^\circ$ , the long-wave infrared radiation intensity is approximately  $400 \text{ W/Sr}$  higher than that of mid-wave; 4) The aerodynamic heating effect on the skin is much more significant at the afterburning flight state; at the detection azimuth angle of  $0^\circ$ , the long-wave infrared radiation intensity is approximately  $330 \text{ W/Sr}$  higher than that of the non-afterburning state. The simulation results show that using the detection wavelength of  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  in the mid-wave infrared and  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  in the long-wave infrared, the PRISM system has good infrared imaging simulation capability for the stealth aircraft target under different flight states, which supports the infrared detection and photoelectric countermeasure research of the fifth-generation stealth aircraft.

**Keywords:** stealth aircraft; aircraft skin; exhaust plume; infrared radiation characteristics

## 1 引言

在现代战场的复杂电磁环境中,对于制空权的争夺成为世界各个军事大国的关注重点,其中尤以隐身飞机的探测识别和攻防对抗为关键任务。在现有的隐身飞机探测技术中,利用隐身飞机高速飞行时的蒙皮气动热效应、羽流热辐射及其扩展效应作为红外成像探测系统的分析依据,具备日夜不间断探测、云雾穿透性强、全天候适应性强等特点,是一种极为有效的探测技术<sup>[1-3]</sup>。

隐身飞机红外辐射特性的计算对象包括两部分:飞机蒙皮、羽流扩展。飞机蒙皮的零视距红外辐射特性由蒙皮涂层的发射率、温度场决定,在大气辐射传输中会受到路径衰减效应的影响;羽流扩展的红外辐射特性与羽流温度场、气体组分含量及分布紧密相关,同时存在扩展过程中的大气路径辐射积分效应。结合零视距辐射特性及辐射传输的影响效应分析,能够获得探测器处的有效红外辐射特性数据。

作为现代红外技术的研究前沿和热点,近年来国际上涌现出大量针对飞机红外辐射特性的研究,典型的有:王东等通过红外热像仪对喷气式飞机尾喷管及尾焰红外辐射特性开展了测量研究<sup>[4]</sup>;田浩等通过建立高轨红外探测模型以及构建对应的预警

探测场景,对两代天基探测器对于不同飞行状态时飞机尾焰的辐射亮度响应特性和模拟成像效果进行量化对比,证明了尾焰辐射探测对于隐身飞机目标识别的有效性<sup>[5]</sup>;李丽娟等研究了红外成像导引头对隐身飞机探测性能提升途径,采用优化系统工作参数设计、提高成像质量和场景自适应性、采用低信杂比目标检测截获等技术以提高系统对隐身飞机的探测识别能力<sup>[6]</sup>;王晓军等对于超音速飞机红外辐射及隐身特性的影响因素如温度、透过率、发射率开展了不确定性分析<sup>[7]</sup>;孙文静等从飞机羽流的红外抑制和粒子弥散的角度,开展飞行器红外隐身技术研究<sup>[8]</sup>;Knežević等基于理论分析、红外测量和对比跟踪,研究了弱小飞机目标的红外特征建模<sup>[9]</sup>。然而,相关研究受限于光电成像仿真系统的整体水平,为此,以构建基于第一性原理的、物理可信的光电场景全链路仿真系统为关键技术手段,能够有效支撑隐身飞机红外辐射特性的计算研究。

面向隐身飞机红外辐射特性研究亟需,西安电子科技大学 IRTI 团队开发了自主化的物理可信光电磁场景仿真与图像生成系统 PRISM,并基于该系统开展隐身飞机目标建模、温度场计算、辐射特性计算、图像仿真等一系列研究工作,综合研究隐身飞机蒙皮、羽流的红外辐射特性和大气辐射传输效应算

法;分析隐身飞机在加力、非加力飞行状态下的目标红外辐射特性;分析隐身飞机红外探测优选波段,并开展自主化 PRISM 系统对于中波、长波红外波段下隐身飞机目标红外成像仿真适用性的验证工作。

本文首先介绍 PRISM 系统架构及功能;然后,详细说明基于 PRISM 系统的隐身飞机蒙皮及羽流的红外辐射特性、大气辐射传输效应计算方法;接着,利用 PRISM 系统计算目标在不同飞行状态下的红外辐射特性数据,并进行中波 3 ~ 5 μm、长波 8 ~ 12 μm 的红外图像仿真;最后,得出本文研究结论,为隐身飞机红外探测提供重要科学依据和技术支撑。

## 2 PRISM 光电场景仿真与图像生成系统

PRISM 光电场景仿真与图像生成系统基于 Qt 框架<sup>[10]</sup>,目标是光电场景生成、图像仿真、目标-背景辐射特性分析、光电对抗等提供一体化的解决方案,具备从三维场景加工到光电图像生成的“端到端”成像全链路仿真功能,可实时生成高置信度光电图像。PRISM 系统由前处理模块、场景建模模块、场景编辑模块、三维场景渲染模块、后处理模块共五大核心功能模块组成,系统架构如图 1 所示。

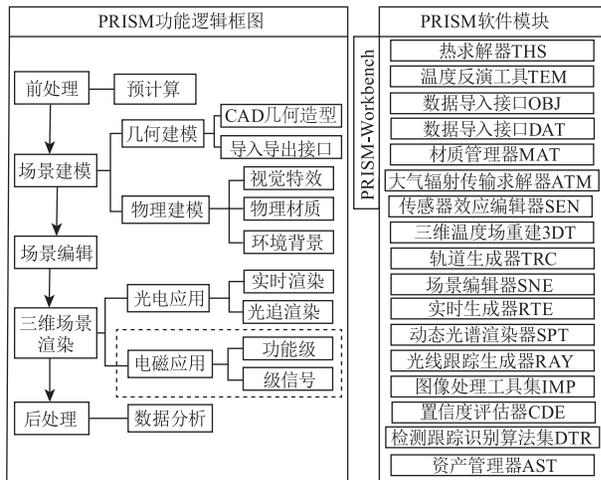


图1 PRISM 系统架构

Fig. 1 System architecture of PRISM

在场景建模阶段,PRISM 支持通过外部接口导入并加载常用的三维模型(\*.obj、\*.fbx、\*.stl等),也支持通过 Boolean 运算建立场景中的目标模型。对于已建立的模型,使用资产管理器 AST 对场景建模阶段的所有资源进行数据管理,从而应用于复杂场景模型构建。

在场景编辑阶段,针对典型天空背景场景,使用

场景编辑器 SNE 设定目标三维交互环境。特别地,为精确计算大气辐射传输效应对飞机红外辐射特性的影响,使用大气辐射传输求解器 ATM 设定气象参数并仿真求解。在场景编辑完成后,生成场景描述文件(\*.sne),可进一步导入至光线跟踪生成器 RAY、实时渲染生成器 RTE 或动态光谱渲染器 SPT 进行后续仿真。

热求解器 THS 用于计算目标及背景环境的三维温度场分布,是计算隐身飞机红外辐射特征数据的关键。

基于 PRISM 系统的隐身飞机红外辐射特性计算流程如图 2 所示。

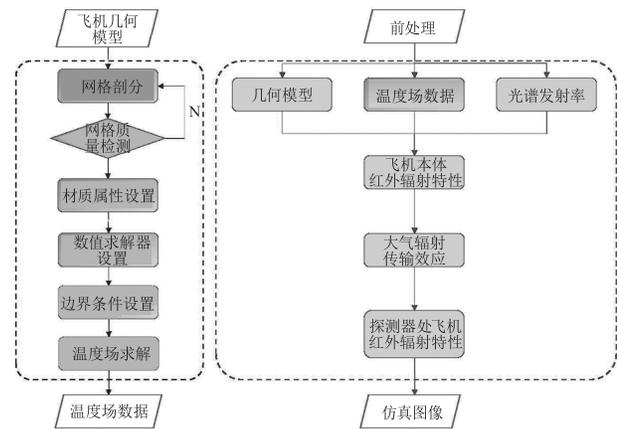


图2 隐身飞机红外辐射特性计算流程

Fig. 2 Calculation process of infrared radiation characteristics of stealth aircraft

## 3 隐身飞机红外辐射特性计算方法

### 3.1 蒙皮温度场计算

蒙皮温度场是隐身飞机蒙皮红外辐射特征的计算关键。飞机蒙皮温度的主要影响因素包括:气动热效应、环境辐射加热(太阳、大气辐射等)、内热源(发动机、尾喷管等)向外散热。以国际某型隐身飞机为对象,蒙皮温度场计算方法介绍如下。

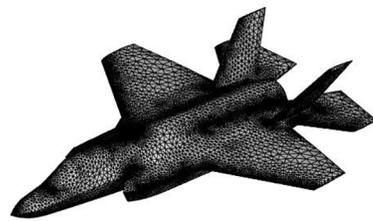


图3 目标几何建模

Fig. 3 Geometric modeling of the target

首先,进行飞机目标几何建模,如图 3 所示。根据目标真实尺寸,确定合适的模型比例。然后,通过

PRISM 系统的 THS 模块进行蒙皮温度场计算。飞机蒙皮的换热项包括与外流场之间的对流换热、辐射换热,以及与内部冷却管之间的传导换热。

THS 模块集成了大型商用 CFD 软件 Fluent<sup>[11]</sup> 的计算能力,对于飞机外流场的流体力学计算采用 SST  $k-\omega$  (Shear Stress Transport) 粘性模型,用于模拟湍流。该模型基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS),兼顾了  $k-\varepsilon$  模型对于壁面附近的流动区域的适用性以及  $\omega$  模型对于边界层外的湍流区域的适用性。该模型通过求解如下的偏微分方程,考虑湍流产生、传输和耗散的物理过程:

运动涡流粘度:

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (1)$$

湍流动能:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

比耗散率:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中: $k$  为湍流动能; $\omega$  为湍流流量。

上式中的闭合系数和辅助关系为:

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}, \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\} \right\}$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

设定飞机蒙皮材料为碳纤维复合材料,选取合适的物性参数;加力飞行状态下,飞行速度设定为 1.6 马赫;非加力状态下,飞行速度设定为 0.8 马赫。飞机外流场边界条件设为压力远场。

隐身飞机高速飞行时,气动热效应凸显,导致机翼前缘、机头、座舱前缘、引擎进气口等迎风面的温度显著升高。为此,几何模型对应位置处采取加密的网格剖分,从而获得大梯度下精确的温度场分布。

在计算得到蒙皮温度场后,可以用如下公式初

步验证其正确性:

$$T_s = T_a \left[ 1 + k \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) Ma^2 \right] \quad (4)$$

式中, $T_s$  为蒙皮温度; $T_a$  为环境温度; $k$  为恢复系数; $Ma$  为飞行马赫数; $\gamma$  为比热比,喷气发动机燃后气体的  $\gamma$  值常取为 1.33。

### 3.2 羽流物理场计算

羽流物理场包括温度场、气体组分质量分布等信息。隐身飞机羽流的主要成分是二氧化碳和水蒸气,它们既是良好的红外辐射发射体,又是良好的红外辐射吸收体。其中,二氧化碳的红外发射峰值波长位于 4.3  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$  等附近,水蒸气的红外发射峰值波长位于 2.7  $\mu\text{m}$ 、6  $\mu\text{m}$  等附近。由于飞机羽流温度显著高于大气环境温度,在上述波长处,羽流辐射的谱带宽度大于大气吸收的谱带宽度,因此部分弱辐射谱段将超出大气的强吸收谱段范围。

在 PRISM 系统的 THS 模块中,设定单元尾喷口直径为 1.2 m,喷口后方外流场尺寸为  $\Phi 10 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。加力飞行状态下,羽流含氧气质量分数为 1.1%,水蒸气质量分数为 12.1%,二氧化碳质量分数为 12.6%,氮气质量分数为 74.2%;非加力状态下,羽流含氧气质量分数为 15.6%,水蒸气质量分数为 3.3%,二氧化碳质量分数为 3.4%,氮气质量分数为 77.7%。羽流流场计算同样采用 SST  $k-\omega$  粘性模型。

由于羽流流场数据量大,在计算其红外辐射特征之前,需要对流场进行切割,以获得指定探测方向和范围内的温度场、气体组分质量分布数据。将任意视线所截取的流场区域切分为温度、组分质量比分布均匀的子层,选取的视线方向决定了所截取到的流场区域和对应辐射量。为确定视线方向,以视线方向与轴线交点到尾喷口距离  $x_0$  和与轴线夹角  $A$  这两个参量为依据,如图 4 所示。

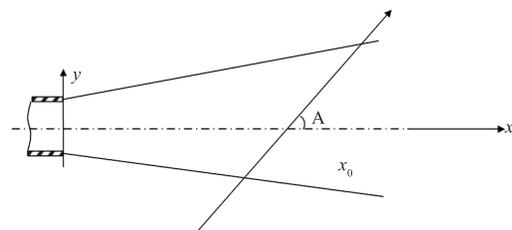


图 4 流场探测示意

Fig. 4 Schematic diagram of detection of flow field

沿视线方向,切分得到第  $m$  层流场区域的几何

厚度为  $\Delta l_m$ ，温度为  $T_m$ ，组分  $i$  的质量分数为  $f_{m,i}$  ( $i = 1, 2, \dots$ )。为了准确计算视线与每层流场区域相交处的温度、组分质量分数等数据，需要对该层上的数据点进行均匀重采样。重采样时，以距离目标数据点最近的四个原有数据点为基准点，计算每一层上目标采样点的值，如图 5 所示。

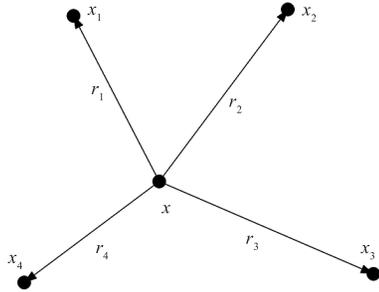


图5 重采样示意

Fig. 5 Schematic diagram of resampling

图中  $x_1, x_2, x_3, x_4$  为基准数据点， $x$  为计算的目标数据点，采用距离反比作为权重因子，则  $x$  点的数据值可以由下式给出：

$$x = \frac{x_1 \frac{1}{r_1} + x_2 \frac{1}{r_2} + x_3 \frac{1}{r_3} + x_4 \frac{1}{r_4}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \quad (5)$$

式中， $r_1, r_2, r_3, r_4$  为基准数据点到计算数据点的距离。

### 3.3 红外辐射特性计算

#### 3.3.1 蒙皮自发辐射特性计算

计算隐身飞机蒙皮的自发红外辐射特性，可将蒙皮视作一定发射率的灰体。首先，根据蒙皮温度场计算结果，通过下式计算蒙皮光谱辐射亮度：

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\varepsilon\tau(\lambda)}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (6)$$

式中， $\varepsilon\tau(\lambda)$  为蒙皮光谱发射率； $k$  为 Boltzmann 常数。

然后，根据飞机蒙皮的有效辐射面积，计算蒙皮自发辐射对探测器处的辐射照度。探测坐标系设置如图 6 所示。以飞机中心为坐标原点  $O$ ，机头方向为  $X$  轴正向，方位角  $\phi$  取值范围  $-180^\circ \sim +180^\circ$ ，逆时针为正；俯仰角  $\theta$  取值范围  $-90^\circ \sim +90^\circ$ ， $XY$  平面以上为正。

给定探测器的  $\phi, \theta$  及探测器到  $O$  的距离  $d$ ，即固定了探测视线方向，通过下式求出飞机蒙皮单元  $n$  在  $(\phi, \theta)$  方向上的投影面积  $A_n$ ：

$$A_n = \frac{4d^2 N \tan(\theta_h/2) \tan(\theta_v/2)}{WH} \quad (7)$$

式中， $W, H$  为渲染窗口水平、垂直方向像素数； $\theta_h, \theta_v$  为探测器的水平视场角、垂直视场角； $d$  为探测距离； $N$  为飞机蒙皮单元  $n$  所占像素数。

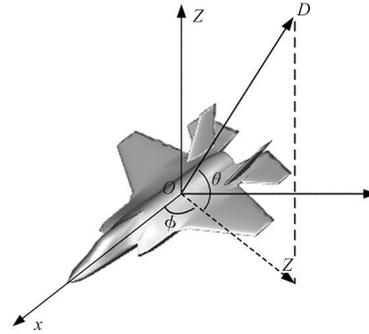


图6 探测坐标系设定

Fig. 6 Coordinate system setting of detection

进一步，通过下式可求出蒙皮在  $(\phi, \theta)$  方向上的自发辐射强度：

$$I_{\text{skin}}(\phi, \theta) = \sum_n \left( A_n \int_{\lambda} L(\lambda, T) d\lambda \right) \quad (8)$$

#### 3.3.2 羽流自发辐射特性计算

羽流的温度场、气体组分质量分布具有极强的非均匀性。羽流自发红外辐射特性计算包括两部分，一是羽流流场自身对辐射的吸收、散射衰减效应，二是羽流路径辐射积分效应。

羽流中的主要成分如二氧化碳、水蒸气等，具有不连续的线状或带状光谱，对应不同波长的红外辐射特性差异明显。在计算羽流吸收相关的光谱透过率  $\tau_a(\lambda)$  时，重点考虑二氧化碳、水蒸气的影响，计算公式如下：

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \quad (9)$$

式中， $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda), \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$  为二氧化碳、水蒸气吸收相关的光谱透过率，可通过分子的带吸收模型或查找表方法求出。

羽流散射相关的光谱透过率  $\tau_s(\lambda)$  可以通过下式计算：

$$\tau_s(\lambda) = \exp \left[ -\frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q x \right] \quad (10)$$

式中， $\lambda_0$  为指定波长，一般取  $0.6 \mu\text{m}$ ； $V$  为气象视程； $q$  为经验常数； $x$  为探测距离。

因此，羽流总体光谱透过率  $\tau(\lambda)$  可以通过下式求出：

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) \tau_s(\lambda) \quad (11)$$

在计算羽流路径辐射积分效应时,根据探测视线方向上的羽流流场切分得到的一系列子层对应的温度、气体组分质量分布等数据,通过下式计算所有  $m$  层流场在  $(\phi, \theta)$  方向上的自发辐射强度积分:

$$I_{\text{plume}}(\phi, \theta) = \int_m \int_{\lambda} A_m L_m(\lambda, T) \tau(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

式中,  $A_m$  为第  $m$  层流场在  $(\phi, \theta)$  方向上的投影面积。

那么,飞机整体的自发辐射强度为蒙皮、羽流自发辐射强度之和:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{skin}} + I_{\text{plume}} \quad (13)$$

### 3.3.3 大气辐射传输效应计算

在仿真计算中通常采用红外辐射衰减方程来描述经大气衰减后到达传感器入瞳处辐射的物理过程。对于飞机目标、背景、大气相互作用下辐射衰减计算,传统的基于大气平均透过率进行辐射衰减计算会引入不同程度的计算误差。为此,PRISM 系统中采用高精度的波段辐射衰减方程来描述目标各辐射成分(如自辐射、反射等)与大气之间存在的光谱耦合性,计算公式如下:

$$L_{\text{app}}^{\text{all}}(x, \theta_r, \phi_r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda}(x, \theta_r) L_{bb, \lambda}(T_x) \tau_{\lambda}(\vec{l}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega} f_{r, \lambda}(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) L_{\Delta\Omega, \lambda}(x, \theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \cdot \tau_{\lambda}(\vec{l}) d\omega d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{suf}, \lambda}(x, \theta_r) L_{\text{back}, \lambda}(x) \tau_{\lambda}(\vec{l}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L_{\text{pth}, \lambda}(\vec{l}) + L_{\text{psc}, \lambda}(\vec{l})] d\lambda \quad (14)$$

式中,  $L_{\text{app}}^{\text{all}}(x, \theta_r, \phi_r)$  是朝向观察方向  $(\theta_r, \phi_r)$  的传感器入瞳处所接收到的物体表面  $x$  点表观辐亮度;  $\varepsilon_{\lambda}(x, \theta_r)$  是  $x$  点的物体表面光谱方向发射率;  $L_{bb, \lambda}(T_x)$  表示  $x$  点的温度为  $T_x$  的黑体光谱辐亮度;  $\vec{l}$  表示目标与探测器之间的大气传输路径;  $\tau_{\lambda}(\vec{l})$  是大气传输路径的光谱透过率;  $f_{r, \lambda}(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$  是  $x$  点的物体表面双向反射率光谱分布函数;  $L_{\Delta\Omega, \lambda}(x, \theta_i, \phi_i)$  是入射方向为  $(\theta_i, \phi_i)$ 、照射到  $x$  点的入射光源辐射亮度;  $\Omega$  是  $x$  点所在表面的  $2\pi$  半球空间;  $\tau_{\text{suf}, \lambda}(x, \theta_r)$  是  $x$  点的物体光谱方向透过率;  $L_{\text{back}, \lambda}(x)$  是从背面入射到物体  $x$  点的环境辐射亮度;  $L_{\text{pth}, \lambda}(\vec{l})$  是大气热程光谱辐射;  $L_{\text{psc}, \lambda}(\vec{l})$  是太阳散射路径光谱辐射。

对于包含选择性辐射体在内的各类辐射体来说,可将公式(14)转化为精确、实时的表观辐射计算方程如下:

$$L_{\text{app}}^{\text{all}}(x, \theta_r, \phi_r) = L_{bb}(T_x) \cdot \tau_{\text{eff}_e} + E_{\text{env}}(\theta_N) \cdot \tau_{\text{eff}_a} / \pi + D(g, u, v, w) \cos\theta_{\text{sun}} E_{\text{sun}}(x) \cdot \tau_{\text{eff}_d} + L_p(\vec{l})$$

式中,  $\tau_{\text{eff}_e}$  实质上描述了在黑体归一化光谱分布的加权影响下、耦合在一起的物体光谱发射率与大气光谱透过率对基本辐射项  $L_{bb}(T_x)$  的有效平均衰减作用;  $\tau_{\text{eff}_a}$  描述了在归一化的环境辐射光谱分布的加权影响下、耦合在一起的物体光谱漫反射率与大气光谱透过率对基本辐射项  $E_{\text{env}}(\theta_N)$  的有效平均衰减作用;  $\tau_{\text{eff}_d}$  反映了在归一化的太阳辐射光谱分布的加权影响下、耦合在一起的物体法向光谱反射率与大气光谱透过率对基本辐射项  $E_{\text{sun}}(x)$  的有效平均衰减作用;  $D(g, u, v, w)$  为方向因子。

对于平均辐射衰减方程中的大气平均透过率、大气路径辐射,以及有效均值衰减方程中的各有效平均因子,利用 MODTRAN<sup>[12]</sup> 软件计算光谱透过率、光谱程辐射时是相当耗时的,而对各光谱值进行光谱积分以求得相应的带内物理量其计算量亦不小。为满足高分辨率、高帧频的实际仿真需求,PRISM 中根据气象条件、观察几何等参数的变化进行预计算,构建 GPU 查找表,其原理如图 7 所示。

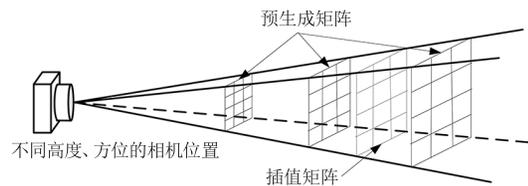


图 7 大气参数查找表插值原理

Fig. 7 Interpolation principle of atmospheric parameter lookup table

## 4 仿真计算结果

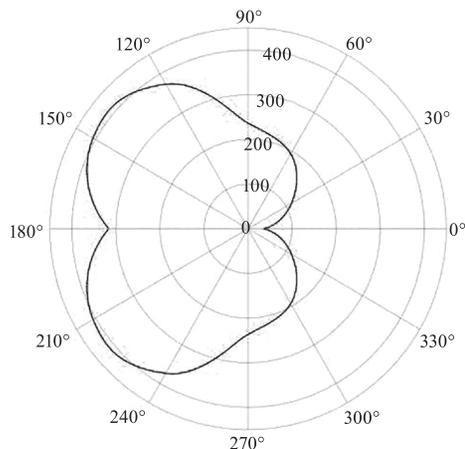
### 4.1 隐身飞机整体红外辐射特性计算结果

以该型隐身飞机为计算对象,设定气温为 279.2 K,飞行速度为 0.8 马赫,发动机处于非加力状态。当探测器至目标距离为 20 km 时,隐身飞机蒙皮和羽流的整体红外辐射在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$  波段下的计算结果分别如图 8(a)、(b) 所示:

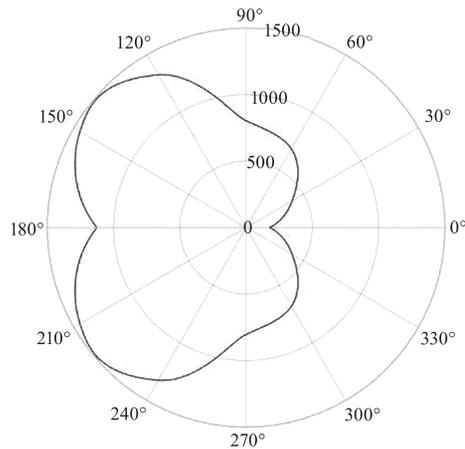
保持探测距离不变,改变飞行状态:飞行速度为 1.6 马赫,发动机处于加力状态。隐身飞机蒙皮和

羽流的整体红外辐射在 3 ~ 5 μm、8 ~ 12 μm 波段下的计算结果分别如图 9(a)、(b)所示:

由计算结果可知,在中波 3 ~ 5 μm、长波 8 ~ 12 μm 两个红外探测波段下,隐身飞机整体的后向辐射值比前向辐射值更高;在 0°探测幅角方向(即正对机头方向)的辐射强度值最小。

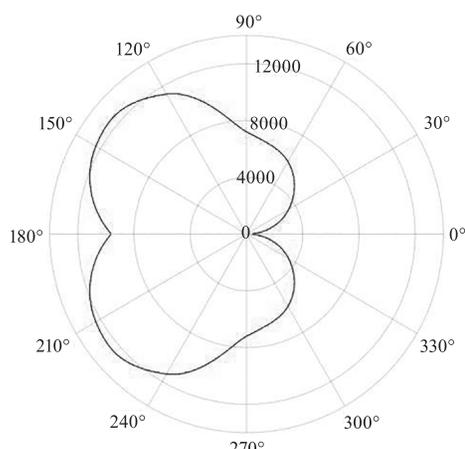


(a) 非加力3~5 μm

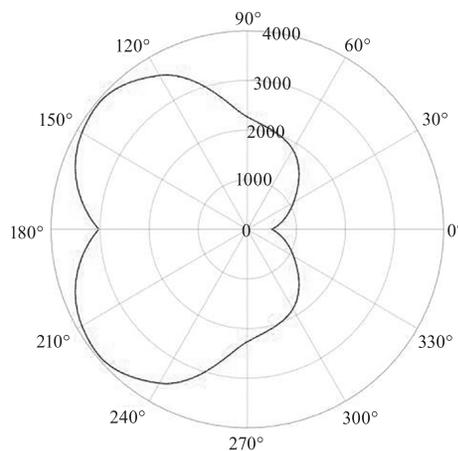


(b) 非加力8~12 μm

图8 非加力状态下的整体红外辐射特性  
Fig.8 Global infrared radiation characteristics at the non-afterburning state



(a) 加力3~5 μm



(b) 加力8~12 μm

图9 加力状态下的整体红外辐射特性  
Fig.9 Global infrared radiation characteristics at the afterburning state

在非加力飞行状态下,羽流辐射扩展尚不显著,隐身飞机整体的辐射强度最大值位于约 140°、220°探测幅角方向,长波红外辐射最大值约为中波最大值的 3.5 倍;在 0°探测幅角方向,机身对尾喷口、羽流核心区及有限的扩展区域形成遮挡,辐射强度主要来自机身蒙皮的长波红外贡献,3 ~ 5 μm、8 ~ 12 μm 波段对应的辐射强度分别为 36.9 W/Sr、177.5 W/Sr,长波红外辐射强度高于中波约 140 W/Sr。

在加力飞行状态下,羽流辐射扩展效应显著,由于高温羽流的中波红外贡献,隐身飞机整体的中波红外辐射显著超过长波,中波红外辐射最大值约为长波最大值的 3.2 倍;在 0°探测幅角方向,机身遮挡了羽流核心区,而加力造成部分羽流扩展区域暴露在探测视窗内,故此时隐身飞机整体的中波红外辐射强度高于非加力状态,3 ~ 5 μm 波段对应的辐射强度为 102.7 W/Sr;由于加力状态下的飞行速度提升,蒙皮气动热效应更为显著,故此时飞机整体的长波红外辐射强度较非加力状态明显增大,8 ~ 12 μm 波段对应的辐射强度为 503.4 W/Sr,长波红外辐射强度高于中波约 400 W/Sr。上述计算结果与典型条件下地面虚拟实验实测值吻合良好。

#### 4.2 羽流红外图像仿真结果

设定气温为 279.2 K,飞行速度为 0.8 马赫,发动机处于非加力状态。3 ~ 5 μm 波段下羽流红外仿真结果如图 10 所示。

改变飞行状态:飞行速度为 1.6 马赫,发动机处于加力状态。3 ~ 5 μm 波段下羽流红外仿真结果如图 11 所示。



图 10 非加力状态下羽流仿真结果

Fig. 10 Plume simulation results at the non-afterburning state

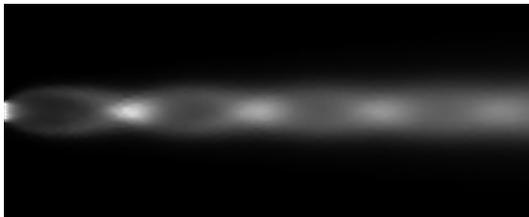


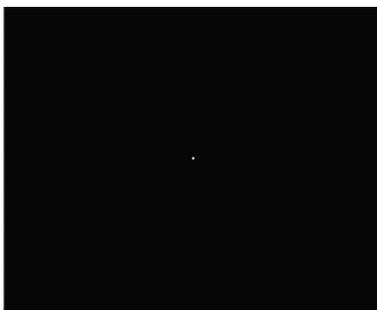
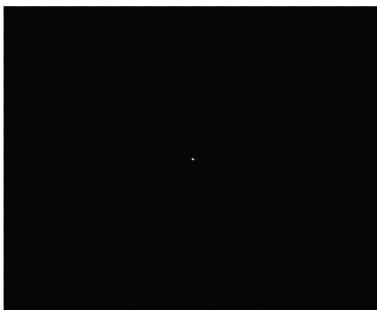
图 11 加力状态下羽流仿真结果

Fig. 11 Plume simulation results at the afterburning state

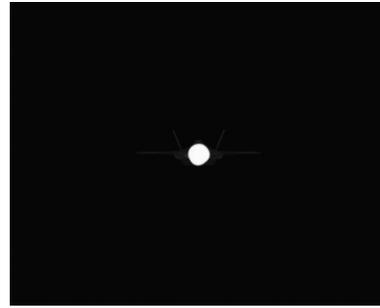
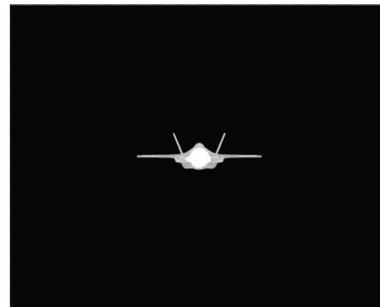
在保持相同的探测距离和视场角条件下,由仿真图像对比可知,发动机处于加力状态下的羽流扩展范围显著增大,并且可以在加力状态下的仿真图像中看到羽流马赫环效应。

#### 4.3 隐身飞机整体红外图像仿真结果

以该型隐身飞机为对象建模,设定探测角度为  $\phi = 180^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ ,气温为 279.2K,飞行速度为 1.6 马赫,发动机处于加力状态。当探测器至目标距离为 20 km 时,3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$  波段下隐身飞机整体的红外仿真结果如图 12、图 13 所示。

图 12 探测距离 20 km 的 3~5  $\mu\text{m}$  仿真结果Fig. 12 Simulation results of 3~5  $\mu\text{m}$  at the detection distance of 20 km图 13 探测距离 20 km 的 8~12  $\mu\text{m}$  仿真结果Fig. 13 Simulation results of 8~12  $\mu\text{m}$  at the detection distance of 20 km

保持飞行状态不变,当探测器至目标距离为 1 km 时,3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$  波段下隐身飞机整体的红外仿真结果如图 14、图 15 所示。

图 14 探测距离 1 km 的 3~5  $\mu\text{m}$  仿真结果Fig. 14 Simulation results of 3~5  $\mu\text{m}$  at the detection distance of 1 km图 15 探测距离 1 km 的 8~12  $\mu\text{m}$  仿真结果Fig. 15 Simulation results of 8~12  $\mu\text{m}$  at the detection distance of 1 km

由图可知,在加力飞行状态下,受到高温羽流扩展效应的影响,羽流红外辐射在仿真视窗中十分显著,且遮蔽了飞机尾喷口和部分蒙皮辐射。

## 5 结 论

本文基于自主化的物理可信光场仿真系统 PRISM,开展了典型隐身飞机目标红外辐射特性计算研究。通过目标几何建模、蒙皮温度场计算、羽流物理场计算,获得了目标零视距红外辐射特性数据;结合大气辐射传输效应分析,计算了探测器至目标距离为 20 km 处的中波 3~5  $\mu\text{m}$ 、长波 8~12  $\mu\text{m}$  对应的目标红外辐射特性数据,并仿真生成了相应波段下的目标红外图像。计算结果表明:1) 在不同红外探测波段下,目标前向、后向辐射强度极小值分别位于  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  探测幅角方向;2) 在目标非加力飞行状态下,采用长波 8~12  $\mu\text{m}$  探测获得的目标辐射强度高于中波探测的结果;在  $0^\circ$  探测幅角方向,机身对尾喷口、羽流核心区及有限的扩展区域形成遮挡,辐射强度主要来自机身蒙皮的长波红外贡献,此时长波红外辐射强度高于中波约 140 W/Sr;3) 在目标加力飞行状态下,尾向探测时,采用中波 3~5  $\mu\text{m}$

探测获得的目标辐射强度显著高于长波探测的结果;在 $0^\circ$ 探测幅角方向,由于机身遮挡了羽流核心区,此时长波红外辐射强度高于中波约 $400\text{ W/Sr}$ ;4)加力飞行状态下的蒙皮气动热效应更为显著,因此在 $0^\circ$ 探测幅角方向,长波红外辐射强度较非加力状态提升约 $330\text{ W/Sr}$ 。上述计算结果与典型条件下地面虚拟实验实测值吻合良好。综上所述,PRISM系统对于不同飞行状态下的隐身飞机目标均具有良好的红外成像仿真能力,能够支撑第五代隐身飞机的红外探测及光电对抗研究。

### 参考文献:

- [1] Dong Q. Y. , Wang Q. Y. , Zhou X. X. , et al. , Simulation of aircraft skin-plume integrated infrared radiation characteristics and verification combined with SDGSAT - 1 TIS data [ J ]. *Infrared Physics & Technology* , 2025 , 145 : 105666.
- [2] Zhou Y. , Wang Q. , Li T. , et al. , A numerical simulation method for aircraft infrared imaging [ J ]. *Infrared Physics & Technology* , 2017 , 83 : 68 - 77.
- [3] Li L. Y. , Fan R. F. , Song Y. , et al. , Research status and development trend of low altitude electro-optic detecting system [ J ]. *Laser & Infrared* , 2023 , 53 ( 11 ) : 1627 - 1636. ( in Chinese )  
李丽亚,樊芮锋,宋亚等. 低空光电探测系统的研究现状及发展趋势 [ J ]. *激光与红外* , 2023 , 53 ( 11 ) : 1627 - 1636.
- [4] Wang D. , Gao J. G. , Chen L. , et al. , Measurement and analysis of infrared radiation characteristics of jet airplane nozzle and flame [ J ]. *Laser & Infrared* , 2024 , 54 ( 7 ) : 1097 - 1101. ( in Chinese )  
王东,高俊光,陈磊,等. 喷气式飞机尾喷管及尾焰红外辐射特性测量分析 [ J ]. *激光与红外* , 2024 , 54 ( 7 ) : 1097 - 1101.
- [5] Tian H. , Wang J. Y. , Wang J. L. , et al. , Analysis of infrared radiation characteristics and low-altitude detectability of a foreign stealth aircraft [ J ]. *Journal of Air & Space Early Warning Research* , 2024 , 38 ( 3 ) : 167 - 172. ( in Chinese )  
田浩,王旌尧,王久龙等. 国外某型隐身飞机红外辐射特性及低空可探测性分析 [ J ]. *空天预警研究学报* , 2024 , 38 ( 3 ) : 167 - 172.
- [6] Li L. J. , Liu K. , Xu Z. Y. , et al. Detection performance improving method analysis of infrared imaging seeker against stealth aircraft [ J ]. *Aero Weaponry* , 2024 , 31 ( 2 ) : 138 - 144. ( in Chinese )  
李丽娟,刘珂,徐振亚等. 红外成像导引头对隐身飞机探测性能提升途径分析 [ J ]. *航空兵器* , 2024 , 31 ( 2 ) : 138 - 144.
- [7] Pan X. Y. , Wang X. J. , Wang R. X. , et al. Infrared radiation and stealth characteristics prediction for supersonic aircraft with uncertainty [ J ]. *Infrared Physics & Technology* , 2015 , 73 : 238 - 250.
- [8] Sun W. J. , Gao Q. H. , Zhang J. Z. , et al. Aerosol infrared stealth technology: Theory and development of infrared suppression and particle dispersion in aircraft plume [ J ]. *Thermal Science and Engineering Progress* , 2023 , 39 : 101695.
- [9] Knežević D. M. , Matavulj P. S. , Nikolić Z. M. Modeling of aircraft infrared signature based on comparative tracking [ J ]. *Optik* , 2021 , 225 : 165782.
- [10] Qt 5. 14 QDoc Manual [ EB/OL ]. The Qt Company Ltd. , Finland , 2020.
- [11] ANSYS Fluent User ' s Guide [ EB/OL ]. ANSYS Inc. , Canonsburg , PA , USA , 2020.
- [12] Berk A. , Conforti P. , Kennett R. , et al. MODTRAN ® 6 : A major upgrade of the MODTRAN ® radiative transfer code [ C ] // 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing ( WHISPERS ). IEEE , 2014.