

〈制导与对抗〉

飞行器红外辐射计算及图像生成技术研究

吴沿庆, 廖守亿, 张作宇, 李晨霖, 花 超
(火箭军工程大学 控制工程系, 陕西 西安, 710025)

摘要: 飞行器红外成像的关键技术是将接收的红外辐射能量转换为可见的灰度图像。基于飞行器红外辐射特性和红外传感器的成像原理, 提出了一种利用射线跟踪(Ray tracing)结合反向蒙特卡洛法(RMC)的飞行器目标红外辐射图像生成技术的实现方法。首先利用三维建模软件建立飞行器的几何模型, 并利用商业软件ICEM对模型进行网格划分, 然后基于流体力学基本守恒定律——N-S方程组的基本原理, 利用Fluent软件对飞行器外流场进行数值模拟, 获得飞行器的温度场分布, 最后利用反向蒙特卡洛法对射线的辐射传递过程进行概率模拟计算, 利用MODTRAN进行了大气传输衰减的透过率计算, 利用射线跟踪技术获得了飞行器的红外辐射图像。

关键词: 红外辐射图像; N-S方程组; 数值模拟; 射线跟踪; 反向蒙特卡洛法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)12-1155-06

Infrared Radiation Calculation and Image Generation Technology for Aircrafts

WU Yanqing, LIAO Shouyi, ZHANG Zuoyu, LI Chenlin, HUA Chao

(Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The key technology of aircraft infrared imaging is to convert the received infrared radiation energy into visible gray images. Based on the infrared radiation characteristics of the aircraft and imaging principle of the infrared sensor, a method to realize the infrared radiation image generation technology of the aircraft target using ray tracing combined with the reverse Monte Carlo method (RMC) is proposed. First, the geometrical model of the aircraft is established using the 3D modeling software, which is meshed by the commercial software ICEM. Then, based on the basic law of conservation of fluid mechanics and principle of the Navier-Stokes equations, external flow field distribution is numerically simulated by Fluent, thus, the temperature field distribution of the aircraft is obtained. Finally, the radiation transmission process was simulated by the RMC, and the transmissivity of the atmospheric transmission attenuation was calculated through the MODTRAN. The infrared radiation image of the aircraft was obtained by the ray tracing technique.

Key words: infrared radiation image, N-S equations, numerical simulation, ray tracing, reverse Monte Carlo method

0 引言

近年来, 随着红外成像制导与探测技术的发展, 飞行器红外辐射特性研究工作越来越受到各国研究者的重视。作为红外特性研究的最终表现形式, 无论是景象投影方式还是信号注入方式, 红外成像仿真技术的关键在于红外图像的生成过程^[1]。目前获得飞行器目

标红外图像主要有两种方式: 一是直接通过红外热像仪等传感器直接获得飞行器红外图像, 二是根据物理模型建立红外辐射计算模型, 通过理论计算获取红外辐射特性参数, 再利用计算机生成红外图像^[2]。综合外场实验的时间、人力、费用和外部环境限制等因素考虑, 国内外普遍采用计算机建模仿真的研究手段。

张文娜、张可利用三维有限元网格的温度计算结

收稿日期: 2017-08-21; 修订日期: 2017-10-16.

作者简介: 吴沿庆(1993-), 男, 安徽池州人, 硕士生, 主要研究方向为导航、制导与仿真方面研究。E-mail: 1351771462@qq.com。

通信作者: 廖守亿(1974-), 男, 重庆人, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为复杂系统建模与仿真、导弹精确制导与控制。E-mail: 6127725@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602296、61673017)、中国博士后科学基金特别资助项目(2014T70974)。

果,将三角网格顶点排序,通过对径向坐标进行排序实现消隐过程,将排序消隐后的温度坐标与二位灰度图像灰度值对应生成了任意分辨率的红外图像^[3-4]。李宏宁对几何体温度等参数进行设置,利用光线跟踪方法对3种典型场景的红外图像进行了计算机仿真^[5-6]。孙卫建立飞机模型利用Fluent软件进行温度场的模拟计算,建立视线方程与亮度矩阵,计算探测器像素点处的红外辐射亮度大小,通过VC++与Open GL编程获得了飞机红外灰度图像^[2]。本文在CFD软件求解温度场的基础上提出了一种结合反向蒙特卡罗法的光线跟踪技术的红外图像生成方法,对红外射线传递过程的反射、散射、吸收等过程进行概率模拟获得飞行器目标的红外辐射亮度,利用MODTRAN软件对探测路径上的大气透过率进行了模拟计算,考虑了太阳、天空、地面等的反射辐射对探测器接收红外辐射的影响,最终获得了探测器成像平面经灰度转换后的飞行器红外辐射图像。

1 计算模型

1.1 三维建模与网格划分

目前市场上流行的三维建模软件很多,如Pro/E、UG、3dsmax、Autocad、Catia等,但不同软件间的通用接口较少,软件输出文件需要经过格式转换才能被其他软件读取。一些网格划分软件如ICEM, GAMBIT等由于接口限制,对三维模型的文件格式有所限制。本文选择3dsmax 2010软件创建飞行器目标的三维几何模型,如图1所示,将模型以.iges格式保存导入网格划分软件ICEM、CFD软件中进行非结构网格划分,其计算域及飞行器机体网格划分结果如图2所示。整个计算域网格规模为1139万,其中面网格均采用三角形划分,体网格为四面体网格。



图1 3dsmax 2010 建立飞行器的几何模型

Fig.1 Geometry model of an aircraft built by 3dsmax 2010

1.2 流场数值模拟

飞行器在空中飞行状态下的能量交换主要以传导、辐射、对流、气动摩擦4种形式进行,其中对流

和气动加热是飞行器温度场变化的直接影响因素。计算飞行器目标蒙皮温度场分布情况是进行飞行器红外辐射特性分析和红外图像生成工作的前提和基础。

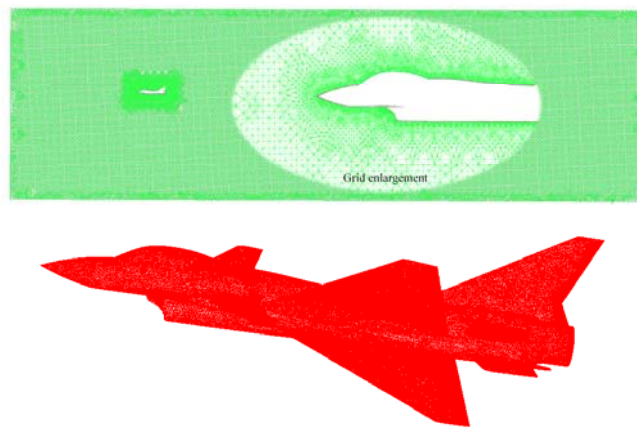


图2 飞行器及外流场网格划分

Fig.2 Meshing of aircraft and outflow field

飞行器空中飞行状态下的流体计算中必须满足质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本定律。计算流体力学中采用求解N-S方程组的方法来解决流动系统中的能量守恒问题,其方程表现形式如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$\text{式中: } Q = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}; F = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho vu - \tau_{xy} \\ \rho wu - \tau_{zx} \\ \rho Hu - b_x \end{Bmatrix}; G = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv + p - \tau_{yx} \\ \rho v^2 - \tau_{yy} \\ \rho wv - \tau_{yz} \\ \rho Hv - b_y \end{Bmatrix};$$

$$H = \begin{Bmatrix} \rho w \\ \rho uw + p - \tau_{zx} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ \rho w^2 - \tau_{zz} \\ \rho Hw - b_z \end{Bmatrix}; S = \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho f_x \\ \rho f_y \\ \rho f_z \\ \rho(uf_x + vf_y + wf_z) \end{Bmatrix}。$$

有关算子 b 的表示为:

$$bx = k \frac{\partial T}{\partial x} + \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w;$$

$$by = k \frac{\partial T}{\partial y} + \tau_{xy}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w;$$

$$bz = k \frac{\partial T}{\partial z} + \tau_{xz}u + \tau_{yz}v + \tau_{zz}w。$$

式中: ρ 为密度; p 为压强; u 、 v 、 w 分别为3个方向的速度分量; τ 为偏应力张量; f 表示体积力大小; E 为内能; H 为焓值, $H=E+V^2/2$, V 为速度。

利用计算流体力学中常用的商用软件 Fluent 对上述方程组进行数值计算, 在给定流场计算域内设置相应边界条件如图 3 所示。

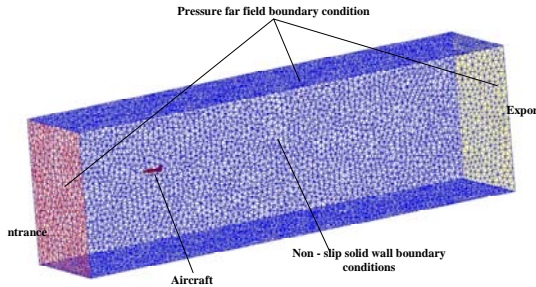


图3 外流场计算域边界条件设置

Fig.3 Outflow field boundary condition setting

在 Fluent 软件中设置流场数值计算条件为: 设定飞行高度为 11 km, 来流速度为 1.6 Ma, 飞行攻角为 0°, 外流场入口、出口及流场边界均设置为压力远场边界条件, 给定初始条件为压力 22700 Pa, 环境温度 230 K; 机身蒙皮均采用绝热无滑移边界条件, 给定壁温为 300 K。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 标准模型(式(2)、(3)), 超音速飞行状态下空气强烈压缩, 模型设置中选择粘性加热作用 (Viscous Heating), 近壁面附近采用标准壁面函数处理 (Standard Wall Functions)。采用基于压力耦合的半隐式 Simple 算法, 二阶迎风格式进行离散, 求解过程实施亚松弛, 解的收敛精度判别标准取残差不小于 10^{-4} 。

湍动能 k 方程:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2)$$

耗散率 ε 方程:

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中: t 是时间; σ_k 、 σ_ε 分别代表 k 、 ε 对应的普朗特数, 通常取值 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$; G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能; G_b 是由于浮力引起的湍动能; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 是模型常数, 分别取值为 1.44、1.92、0.09; Y_M 是可压速湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; 湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 。

1.3 温度场分布

计算中进行超过 1000 次以上的迭代计算获得了飞行器目标的蒙皮温度场分布结果如图 4 所示。

2 红外辐射计算

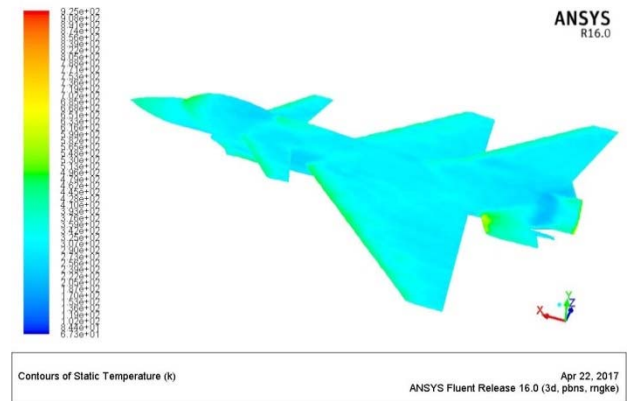


图4 蒙皮温度场分布云图

Fig.4 Nephogram of skin temperature distribution

在工程计算中一般将飞行器蒙皮视为发射率为定值 ($\varepsilon=0.9$) 的灰体进行红外辐射亮度的计算, 对于给定波段飞行器红外辐射亮度可表示为:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_B(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (4)$$

$$L_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{\varepsilon}{\pi} M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (5)$$

式中: $M_B(\lambda, T)$ 为黑体辐射出射度; $M_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为指定波段下的光谱辐射出射度; c_1 为第一辐射常数取值 $3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$; c_2 为第二辐射常数取值为 $1.438 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; $L_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为该波段下的飞行器红外辐射亮度 ε 为蒙皮发射率取值为 0.9。

在红外辐射传输方向上, 辐射热能遵循能量守恒定律, 对于具有吸收、发射、散射性质的介质, 在位置 \mathbf{r} 、沿方向 \mathbf{s} 的辐射输方程为:

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = kI(\mathbf{r}, \mathbf{s}) - aI(\mathbf{r}) - \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (6)$$

式中: \mathbf{r} 为位置向量; \mathbf{s} 为沿程长度 (行程长度), 为方向向量; \mathbf{s}' 为散射方向; k 为总衰减率; a 为吸收系数; n 为折射系数; σ_s 为散射系数; I 为辐射强度, 依赖于位置 (\mathbf{r}) 与方向 (\mathbf{s}); T 为当地温度; Φ 为相位函数; Ω 为空间立体角。

在传输过程中不考虑大气中介质的散射作用, 则式(6)辐射传输方程可改写为:

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = kI(\mathbf{r}, \mathbf{s}) - aI(\mathbf{r}) \quad (7)$$

对红外辐射强度的计算采用反向蒙特卡洛法 (Reverse Monte Carlo method, RMC) [7-9]。RMC 法是一种概率模拟的计算方法, 通过探测点处发射光束然后跟踪光束的能量传输过程, 将能量传输过程分为发

射、吸收、反射等一系列独立的子过程，对每个过程建立起相应的概率模型。传输中，如果射线被吸收则停止对光线的跟踪，如果射线被面元反射则继续跟踪射线，直到射线被吸收或逸出流场计算域，对射线传输路径上的能量衰减过程进行计算，将发射的所有光线的能量进行求和计算，最终可获得到达探测点处的总的红外辐射强度，其计算流程和计算过程示意如图5、图6所示。

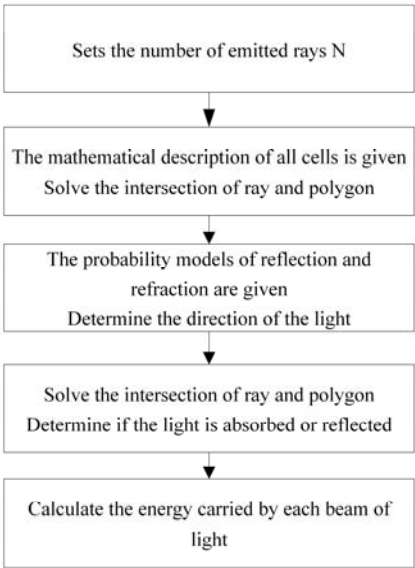


图5 反向蒙特卡洛法计算流程

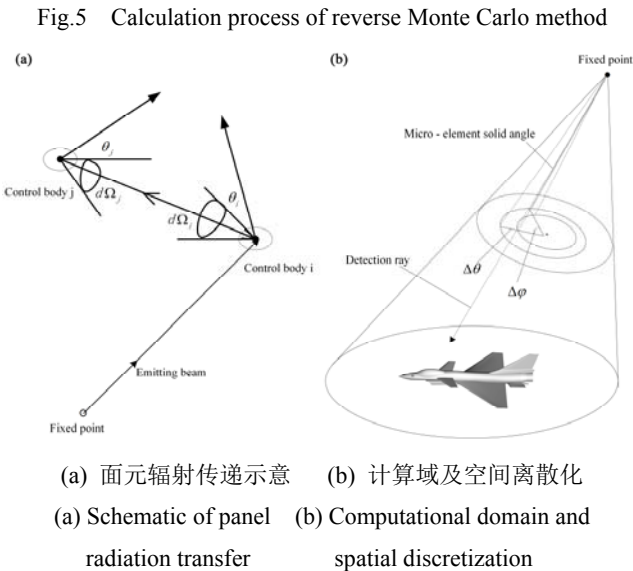


图6 反向蒙特卡洛法计算示意图

Fig.6 Sketch map of reverse Monte Carlo method

3 大气传输计算

3.1 大气透过率计算

红外辐射在大气中的传输过程实际上会受到大气的吸收和散射等作用而产生衰减，根据大气衰减作

用在不同波段的影响程度的不同，大气中存在明显的3个吸收作用较小的波段被称为“大气透过窗口”。根据布格尔定律，大气的衰减作用实际上可用大气透过率 $\tau(\nu)$ 来表示^[10]：

$$\tau(\nu) = \frac{P(\nu, l)}{P(\nu, 0)} = e^{-k(\nu)\rho l} = e^{-(\alpha(\nu) + \beta(\nu))\rho a} = \tau_{\alpha}(\nu) \cdot \tau_{\beta}(\nu) \quad (8)$$

式中： ν 表示波数， cm^{-1} ； l 为大气厚度，m； ρ 为衰减介质密度， g/m^3 ； $P(\nu, l)$ 为 l 处的光谱辐射功率，W。

基于大气衰减机理对大气透过率进行建模计算的过程极其繁琐，同时计算精度和计算的实时性也难以得到保障。文中利用大气辐射建模中常用的专业软件MODTRAN进行大气透过率的计算。计算中设定探测器高度为14 km，飞行器飞行高度为11 km，探测器观测视线天定角为 126.87° ，及探测器距飞行器目标的传输斜路径距离为5 km。对大气环境的反演条件为：大气廓线选择中纬度夏季大气模式（北纬 45° ，7月）；地表类型为森林模式；气溶胶参数为乡村型，单散射模式；水平气象视距为23 km，无云无雨情况，夏至北回归线上正午12时。探测路径上8~14 μm 波段的大气透过率计算结果如图7所示。

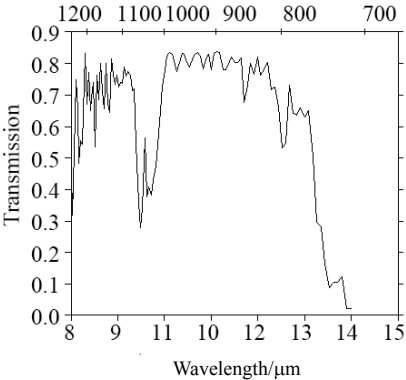


图7 8~14 μm 红外波段大气透过率计算结果

Fig.7 Calculation result of atmospheric transmittance in band 8-14 μm

3.2 环境辐射及程辐射计算

探测器接受到的红外辐射不仅来自飞行器目标自身的辐射还有来自大气环境的辐射和地球表面的辐射以及反射的太阳辐射等。在MODTRAN中设置光谱分辨率为 5 cm^{-1} ，得到8~14 μm 红外波段的太阳辐射度 $M_{\text{太阳}}$ 、天空辐射度 $M_{\text{天空}}$ 、地球辐射度 $M_{\text{地球}}$ 及程辐射计算结果如图8。

将上述辐射度计算结果在8~14 μm 波段内对波长进行积分后经公式变换，即可得到指定观测路径上对应的红外辐射强度。

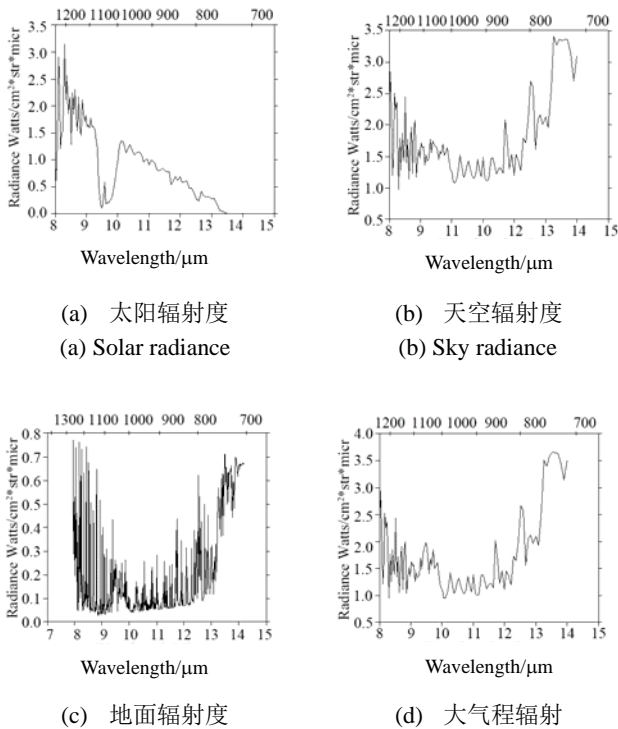


图8 辐射度计算结果 Fig.8 Radiometric calculation results

4 红外图像生成

4.1 投影变换与消隐

从三维空间的目标飞行器到探测器接受红外辐射信息转换为可见二维红外辐射图像过程中, 最重要也是最核心的问题就是飞行器的投影变换和消隐工作的实现。本文采用基于视点的透视投影方法进行红外图像的生成技术研究。

针对图像的消隐计算有很多种成熟和应用广泛的算法, 如 Z-buffer 算法、扫描线算法、画家算法、多边形排序算法等^[3], 也有基于 Open GL、OGRE 等硬件加速^[11]的图像消隐算法。根据消隐原理可分为 3 类: 一是基于像素点排序, 对像素点逐一进行可见性检测, 显示可见像素; 二是对面元的可见性进行比较和几何计算保留可见几何面元; 三是对线与面进行求交计算, 根据交点与面元的位置关系确定面元的可见性。本文采用第 3 种原理进行消隐计算, 采用光线跟踪算法。

4.2 结合 RMC 法的光线跟踪法图像生成过程

真实感场景渲染计算中通常利用光线追踪术进行图像生成工作以获得逼真效果, 根据对发射光线路径的处理方式不同, 光线追踪技术有光线追踪 (Ray Tracing) 和光线投射 (Ray Casting) 两种, 其区别在于光线跟踪算法对光线的投射过程进行跟踪, 对光线

与物体接触后的光线的反射或散射过程进行多次跟踪, 直到光线被吸收或者进入环境。在飞行器目标的红外图像生成计算中, 根据光线跟踪原理, 在视点位置发射经过探测器像元的光线与飞行器目标相交, 对光线的反射、散射和吸收过程采用第 2 章中介绍的概率模拟方法 RMC 法进行计算, 通过反向统计到达探测器像素点的红外辐射强度即可在探测器成像平面形成可见的红外辐射图像, 其成像过程如图 9 所示。

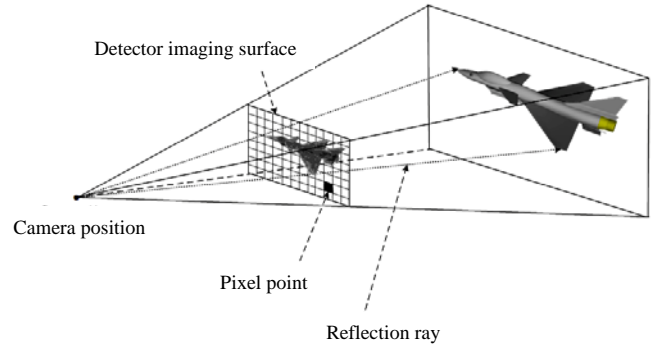


图9 光线跟踪法红外图像生成示意图

Fig.9 Sketch of infrared image generation by ray tracing

给定射线 \mathbf{r} , 其向量形式表达为:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{O} + t\mathbf{d} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{r}(t)$ 表示射线所在位置; \mathbf{O} 为视点所在位置; \mathbf{d} 为射线传输方向; t 为传输距离。

在网格划分过程中全部采用三角形网格划分, 对给定的三角网格节点 (顶点) $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$, 空间平面的一般方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (10)$$

以三角面元节点确定的空间平面的系数如下:

$$\begin{cases} A = (y_2 - y_1) \times (z_3 - z_1) - (z_2 - z_1) \times (y_3 - y_1) \\ B = (z_2 - z_1) \times (x_3 - x_1) - (x_2 - x_1) \times (z_3 - z_1) \\ C = (x_2 - x_1) \times (y_3 - y_1) - (y_2 - y_1) \times (x_3 - x_1) \\ D = -(A \times x_1 + B \times y_1 + C \times z_1) \end{cases} \quad (11)$$

将空间平面方程(9)、(10)与射线所在直线方程联立即可求出参数 t 和交点坐标 $M(x_i, y_i, z_i)$ 。判断交点是否在三角面元内可采用叉乘法判断, 即沿着三角形的边顺时针 (或逆时针) 方向走, 判断交点是否在每条边的右侧 (或左侧), 如果交点均在边线的右侧 (或左侧) 则在三角形内, 否则在三角形外, 用向量描述即 3 条边所在向量叉乘结果为同号。

$$\begin{cases} \mathbf{MA} = (x_i - x_1, y_i - y_1, z_i - z_1) \\ \mathbf{MB} = (x_i - x_2, y_i - y_2, z_i - z_2) \\ \mathbf{MC} = (x_i - x_3, y_i - y_3, z_i - z_3) \end{cases} \quad (12)$$

$\mathbf{MA} \times \mathbf{MB} > 0$ 、 $\mathbf{MA} \times \mathbf{MC} > 0$ 、 $\mathbf{MB} \times \mathbf{MC} > 0$ 或都小于 0 时交点在三角面元内, 根据射线与面元的交

点关系即可实现成像消隐过程。

4.3 红外图像生成结果

给定空中目标飞行器的飞行状态为：飞行高度为11 km，飞行攻角为 0° ，飞行速度为 $1.6 Ma$ ，大气环境温度为220 K，环境压强为22700 Pa。探测器观测高度为14 km，观测天顶角为 126.87° ，大气传输斜径距离为5 km时，在不同观测位置获得飞行器 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射图像如图10所示。

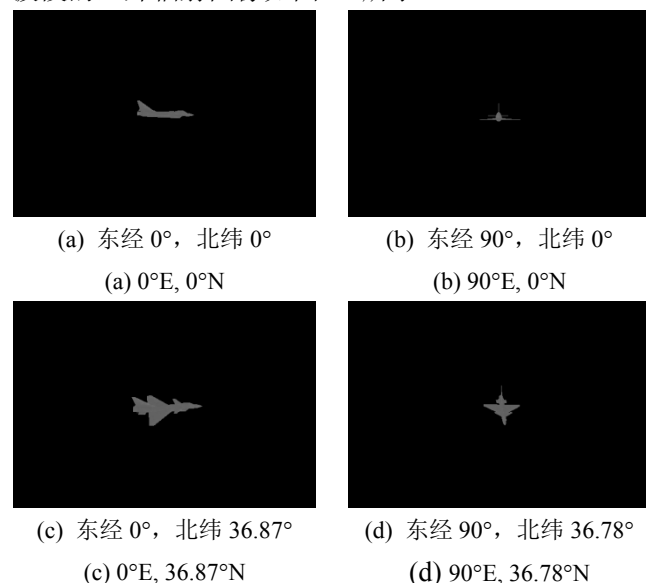


图10 不同观测位置下 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段红外辐射图像

Fig.10 Infrared radiation images at different observation positions in $8\sim 14\ \mu\text{m}$ band

5 结论

飞行器目标的红外辐射信息转换为可见红外辐射图像过程是红外仿真最重要、最关键的一个环节。本文在商用CFD软件Fluent数值求解飞行器目标的外流场的基础上，获得了飞行器目标在一定飞行状态下的蒙皮温度场分布情况，同时考虑了太阳、天空地面反射等对探测器接收红外目标红外辐射的影响。在红外图像生成工作中参考可见光成像常用的光线跟踪算法，对光线传递过程的反射、散射和吸收过程进行概率模拟，成像结果较真实地反映了探测器的成像过程，成像效果更细腻真实，为红外成像制导的半实物仿真系统实验研究提供数据基础。

参考文献：

- [1] 娄树理, 曲晓慧, 周晓东. 飞机红外图像生成研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(11): 6-8.
LOU Shuli, QU Xiaohui, ZHOU Xiaodong. Research on infrared image generation of airplane [J]. *Microcomputer Information*, 2011, 27(11): 6-8.
- [2] 孙卫, 王彪. 飞机红外辐射计算及图像仿真[J]. 激光与红外, 2017,

47(6): 728-735.

SUN Wei, WANG Biao. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(6): 728-735.

- [3] 张文娜, 黎宁. 飞机蒙皮温度图像的实现[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(3): 111-113.
ZHANG Wenna, LI Ning. A realization method of aircraft skin temperature image[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2011, 39(3): 111-113.
- [4] 张可, 黎宁, 刘福美, 等. 一种飞行器蒙皮红外辐射图像生成方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 272-277.
ZHANG Ke, LI Ning, LIU Fumei, et al. Method of aircraft skin infrared radiation image generating[J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(3): 272-277.
- [5] 李宏宁, 白廷柱, 马帅, 等. 光线跟踪方法实现红外视景成像仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1387-1391.
LI Hongning, BAI Tingzhu, MA Shuai. Infrared imaging simulation system by ray tracing method [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1387-1391.
- [6] 李宏宁, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 57-62.
LI Hongning, BAI Tingzhu, CAO Fengmei. Infrared imaging model for scene simulation and its invalidation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2010, 29(1): 57-62.
- [7] 单勇, 张靖周, 郭荣伟. 导弹蒙皮红外辐射特性的数值计算与分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 251-255.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou, GUO Rongwei. Numerical computation and analysis of the infrared radiation characteristic of missile scarfskin[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 251-255.
- [8] 刘钢, 额日其太, 朱希娟. 巡航导弹蒙皮红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5): 1012-1017.
LIU Gang, ERI Qitai, ZHU Xijuan. Simulation of infrared radiation characteristics of cruise missile skin by backward Monte Carlo method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(5): 1012-1017.
- [9] 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, 38(2): 232-237.
LV Jianwei, WANG Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 232-237.
- [10] 王海宴. 红外辐射及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
WANG Haiyan. *Infrared Radiation and Its Application*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014.
- [11] 黄曦, 陈伟, 张建奇. 基于GPU的实时红外场景仿真系统研究[J]. 航空兵器, 2015(6): 49-54.
HUANG Xi, CHEN Wei, ZHANG Jianqi. Study on real-time infrared scene simulation system Based on GPU[J]. *Aero Weaponry*, 2015(6): 49-54.