

文章编号: 1672-8785(2016)04-0027-06

大气层内复杂目标的红外辐射计算方法研究

范春懿 谢 放 田 博

(空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 提出了一种将视在光线法 (Light Of Sight, LOS) 与 OpenGL 软件接口相结合的方法。该方法利用 OpenGL 软件接口的深度测试与遮挡查询功能, 确定了复杂外形目标在某探测方向上的有效发射面元及其辐射在介质中的传输路径。然后采用 LOS 法获得了大气层内目标在探测方向上的辐射特性。仿真结果表明, 本文方法行之有效, 且计算效率高。

关键词: 红外特性; 辐射特性; 空间目标

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.04.005

Study of an Algorithm for Calculating Infrared Radiation of Complex Target in Atmosphere

FAN Chun-yi, XIE Fang, TIAN Bo

(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

Abstract: An algorithm combining Light of Sight (LOS) with the OpenGL software interface is proposed. The method uses the depth measuring and occlusion query functions of the OpenGL software interface to determine the effective emission surface in the detection direction and the transfer path of its radiation in mediums. Then, it uses LOS to obtain the radiation characteristics of the target in atmosphere in the detection direction. The simulation result shows that this algorithm is effective and has high computation efficiency.

Key words: infrared property; radiation characteristic; space target

0 引言

目标辐射传输的本质是光线的辐射传输, 即光线从辐射发射点出发, 经过沿程的反射、折射和衰减, 最终到达探测点的过程。对于一般的辐射传输问题, 原则上可以采用有限体积法、离散坐标法、蒙特卡罗法^[1]等多种辐射传输计算方法对其进行模拟。但对于具有复杂外形及流场结构的飞行目标来说, 则会存在复杂外形相

互遮挡以及表面与表面间、表面与流场间的耦合辐射问题, 导致其算法不易实现, 且计算量大, 效率低, 难以实现成像模拟。

本文提出的方法是将 LOS 法与 OpenGL 软件接口结合起来使用 (简称 LOS+OpenGL)。针对复杂外形目标的面元间遮挡问题, 利用 OpenGL 软件接口的深度测试和遮挡查询功能, 高效、准确地确定目标的有效辐射面元。然后采用 LOS 法建立红外辐射传输模型, 获得沿探测方向的

收稿日期: 2016-02-29

作者简介: 范春懿(1976-), 女, 辽宁海城人, 高级工程师, 主要从事目标特性及计算机仿真研究。

E-mail: fanchunyi10@sohu.com

目标辐射特性。最后对乘波体、升力体等典型外形目标的红外辐射特性进行计算。结果表明,该方法行之有效,可明显提高计算效率,使 LOS 法及 OpenGL 软件接口的计算优势得到了充分发挥。

1 目标红外特性计算模型研究

1.1 目标有效发射面元的计算

目标有效发射面元的计算流程是,首先对目标及流场的几何结构进行准确建模,然后利

用 CFD-GEOM 软件将三维复杂目标曲面离散成足够多的小面元,并获得各个小面元的几何位置、表面积和外法向量等几何参量,从而形成目标面元网格文件;接着利用 OpenGL 软件接口的深度测试和遮挡查询功能,确定复杂外形目标在某探测方向上的有效发射面元以及辐射在介质中的传输路径。OpenGL 软件接口的深度缓冲区可确定每个像素是否可见;其遮挡查询功能可确定复杂几何图形在深度测试之后的可见性(见图 1)。

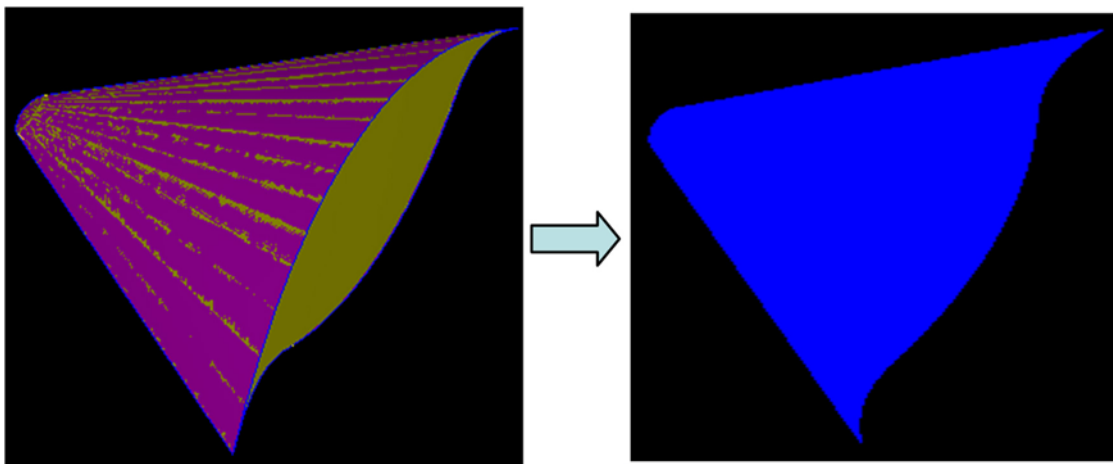


图 1 乘波体外形目标的遮挡查询示意图

作为图形硬件的一种软件接口,OpenGL 是以 SGI 的 GL 三维图形库为基础而制定的通用、共享的开放式三维图形标准。所有的几何图形单元和图像都可用顶点和像素来描述,并被存储在显示列表中。

1.2 表面温度反演工程算法

在计算目标自身的辐射强度时,首先要获得目标的表面温度场。在实际的工程领域中,一般都是给出特殊位置有限点的温度。对于具有非均一温度的目标,利用插值法可获得目标的表面温度分布。本文采用反距离插值法获得了较为准确的温度场分布。该方法是一种加权平均内插法,即认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响,且影响的大小随距离的增加而减小。下面介绍一下反距离插值法。

在某一测定区域内,已知若干测定点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的温度值 $T(x_i)$, 则待测定点 x_0 的

估计温度值 $T(x_0)$ 是其周围点温度值的线性之和,其数学表达式为

$$T(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i T(x_i) \quad (1)$$

式中, λ_i 为与已知点相关的权重。在一定区域内,权重 λ_i 会随着待测定点与测定点间距离的增加而减小。其数学表达式为

$$\lambda_i = [d(x_i, x_0)]^{-P} / \sum_{i=1}^n [d(x_i, x_0)]^{-P} \quad (2)$$

式中, $d(x_i, x_0)$ 为测定点 x_i 与待测定点 x_0 之间的距离。指数 P 的选取决定了权重 λ_i 趋向零的快慢速度,本文取 $P=2$ 。

利用这种插值方法可以得到目标表面上任意一点的温度值。

1.3 目标表面的自身发射计算

在目标表面温度场已知的情况下,目标自身的红外辐射特性可以根据普朗克定律进行计

算。其数学表达式为

$$E_{i,\lambda,emi} = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5} \left(e^{c_2/\lambda T(i)} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

式中, $\varepsilon(\lambda)$ 为目标表面的光谱发射率; $T(i)$ 为表面微元 i 的温度; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 14388 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ 为波长; $E_{i,\lambda,emi}$ 为目标外壁表面上的某点 i 向半球空间的光谱辐射力。

假设各向同性, 目标某点 i 的光谱辐射亮度 $I_{i,\lambda,emi}$ 可用朗伯源模型计算, 其数学表达式为

$$I_{i,\lambda,emi} = \frac{E_{i,\lambda,emi}}{\pi} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m))} \quad (4)$$

1.4 流场辐射传输计算

根据文献 [1], 当考虑介质内的吸收、发射和散射时, 沿 $\vec{\Omega}$ 方向的辐射传输方程为

$$\begin{aligned} \frac{dI_\lambda(s)}{ds} = & -\kappa_{a\lambda} I_\lambda(s) - \kappa_{s\lambda} I_\lambda(s) + \kappa_{a\lambda} I_{b\lambda}(s) \\ & + \frac{\kappa_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(s, \vec{\Omega}') \Phi_\lambda(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) d\Omega' \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $I_\lambda(s)$ 为 $\vec{\Omega}$ 方向上的光谱辐射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})$); $I_{b\lambda}(s)$ 为 $\vec{\Omega}$ 方向上的黑体光谱辐射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})$); $\kappa_{a\lambda}$ 为含粒子的介质的吸收系数 (m^{-1}); $\kappa_{s\lambda}$ 为粒子的散射系数 (m^{-1}); $I_\lambda(s, \vec{\Omega}')$ 为 $\vec{\Omega}'$ 方向上的光谱散射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})$); $\Phi_\lambda(\vec{\Omega}', \vec{\Omega})$ 为散射相函数。

式 (5) 中的右边四项分别为由气体及粒子吸收引起的损失、由粒子散射引起的损失、由粒子发射引起的增益以及由 $\vec{\Omega}$ 方向上的粒子散射所得的增益。

对于不带发动机的大气层内飞行目标, 可不考虑固体粒子的吸收、发射及散射作用; 并可对很小的气体分子的散射能量忽略不计, 即 $\kappa_{s\lambda}=0$ 。由式 (5) 可得传输方程:

$$\frac{dI_\lambda(\tau_\lambda)}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda(\tau_\lambda) + I_{b\lambda}(\tau_\lambda) \quad (6)$$

式中, τ_λ 为光学厚度, $\tau_\lambda = \kappa_{e\lambda} s$; $\kappa_{e\lambda}$ 为介质的衰减系数, $\kappa_{e\lambda} = \kappa_{a\lambda} + \kappa_{s\lambda}$ 。

1.5 LOS 法

从探测器到目标的 LOS 射线 (即与探测方向平行的射线) 在介质中的传输可简化为一维多层介质的辐射传输。因此, 可将射线经过的路径分为 N 层 (见图 2), 并认为每一层都是均匀、等温的介质。在穿过每层介质时, 射线会被吸收和发射。由此递推, 即可获得 LOS 射线的红外辐射射出强度 [2], 即沿 L 方向的逐层递推公式为

$$I_\lambda^j = I_\lambda^{j-1} \bar{\tau}_\lambda^j + I_{b,\lambda}^j (1 - \bar{\tau}_\lambda^j) \quad (7)$$

式中, I_λ^j 为第 j 层的方向光谱辐射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})$); $I_{b,\lambda}^j$ 为第 j 层的黑体光谱辐射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})$); $\bar{\tau}_\lambda^j$ 为第 j 层的介质透过率, $\bar{\tau}_\lambda^j = e^{-\kappa_{a,\lambda}^j L^j}$; $\kappa_{a,\lambda}^j$ 为第 j 层介质的吸收系数 (m^{-1}); L^j 为第 j 层介质内的行程长度 (m)。

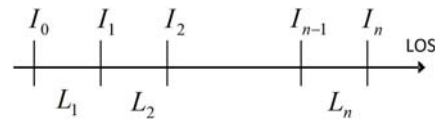


图 2 LOS 计算模型

从任意方向穿过介质的射线的光谱辐射亮度均可通过式 (7) 求得。在探测谱段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的辐射亮度为

$$I_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda d\lambda \quad (8)$$

1.6 目标表面的太阳反射特性模型

由目标表面反射的太阳辐射主要集中在短波区 (紫外、可见光、近红外)。壁面上反射射线的方向依赖于材料表面的双向反射分布函数 [3] (见图 3), 它是表面粗糙度、入射波长、入射角度、介电常数和偏振等因素的函数。

根据双向反射分布函数的定义, 反射率为反射亮度与入射照度之比:

$$\rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL(\lambda, \theta_r, \varphi_r)}{dE(\lambda, \theta_i, \varphi_i)} \quad (9)$$

式中, $dE(\lambda, \theta_i, \varphi_i)$ 为表面 dA_i 沿 (θ_i, φ_i) 方向的入射照度 (表面上的某处面元被照射或接收的辐射通量除以该面元的面积); θ_i 和 φ_i 分别为入射

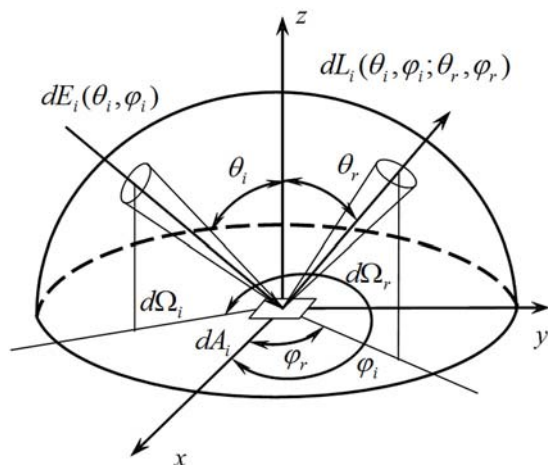


图3 双向反射分布函数的示意图

天顶角和方位角; θ_r 和 φ_r 分别为反射天顶角和方位角; $dL(\lambda, \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向上立体角 $d\Omega_r$ 内的反射亮度; $\rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 的量纲为 Sr^{-1} 。

反射的能量大小与方向 - 半球反射率 $\rho(\lambda, 2\pi, \theta_i, \varphi_i)$ 有关, 其数学表达式为

$$\begin{aligned} \rho(\lambda, 2\pi, \theta_i, \varphi_i) &= \rho(\lambda) \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r \sin \varphi_r d\theta_r d\varphi_r \end{aligned} \quad (10)$$

对于半镜半漫反射的情况, 反射分量可分为镜反射和漫反射分量。假设其方向 - 半球反射率为 $\rho(\lambda)$, 镜反射份额为 f_n , 漫反射份额为 f_m , 其中 $f_n + f_m = 1$, 则镜反射分量的反射率

为 $\rho_s(\lambda) = f_n \times \rho(\lambda)$, 漫反射分量的反射率为 $\rho_d(\lambda) = f_m \times \rho(\lambda)$ 。产生一个光线是否被反射的随机数 R_r , 满足:

$$\begin{cases} 0 < R_r < \rho_d & \text{光线被漫反射} \\ \rho_d \leq R_r \leq \rho & \text{光线被镜反射} \\ \rho \leq R_r \leq 1 & \text{光线被吸收} \end{cases} \quad (11)$$

在镜反射时, 反射方向可直接确定, 其数学表达式为

$$\begin{cases} \theta_r = \theta_i \\ \varphi_r = \varphi_i + \pi \end{cases} \quad (12)$$

太阳辐射热流密度为 $Q = 1.334 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ 。图4和图5所示为太阳从升力体外形目标的正上方入射时, 目标表面反射的总辐射亮度在 4π 空间内的分布情况 (单位为 W/Sr)。结果表明, 表面反射特性对反射辐射的空间分布影响很大。

1.7 复杂外形目标表面间的红外反射计算^[4]

光线与复杂外形目标的表面相交后会发生反射, 并相交于目标的其他表面。当反射次数达到三次以上时, 将会对辐射能量产生较小的影响。

针对乘波体、升力体等典型外形结构, 本文采用反向蒙特卡洛法建立了红外反射计算模型。辐射传递特性计算结果表明, 反射率小, 计

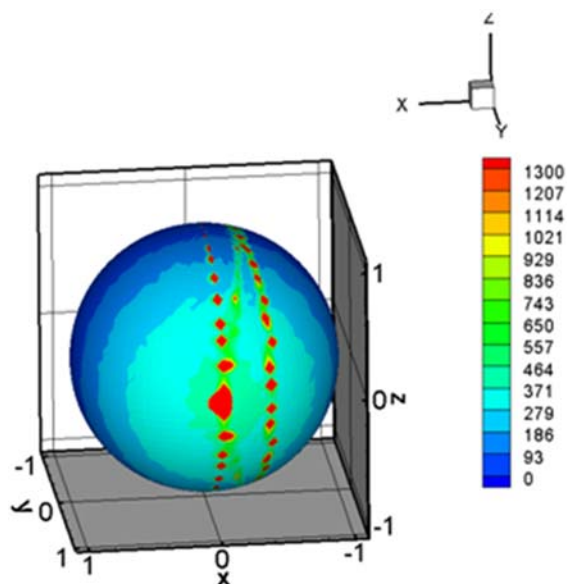


图4 总反射亮度的角分布 (镜漫比和反射率均为 0.5)

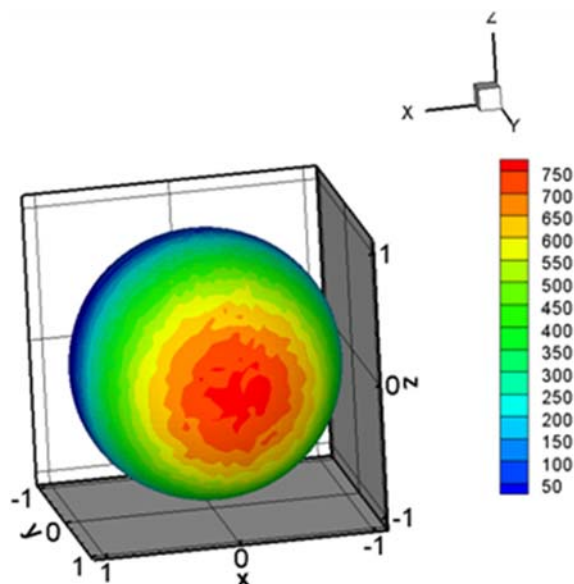


图5 总反射亮度的角分布 (漫反射、反射率为 0.5)

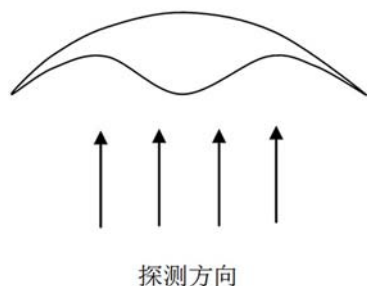


图 6 在乘波结构曲面下, 辐射亮度比与反射次数的关系

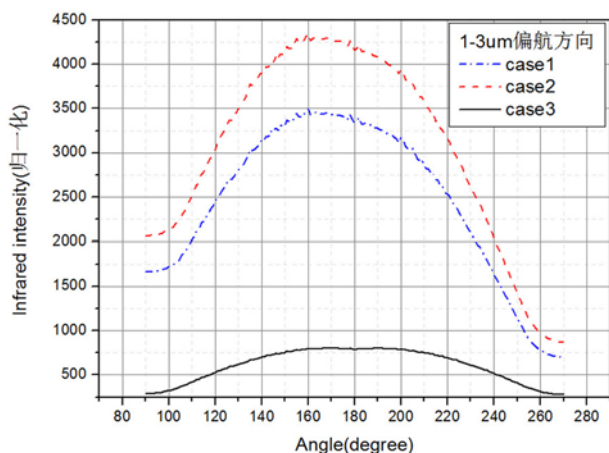
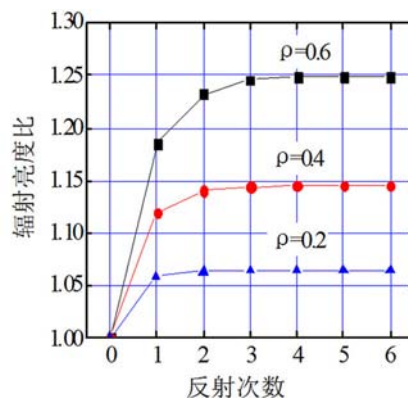


图 7 单位立体角内辐射能量随探测入射角的变化曲线

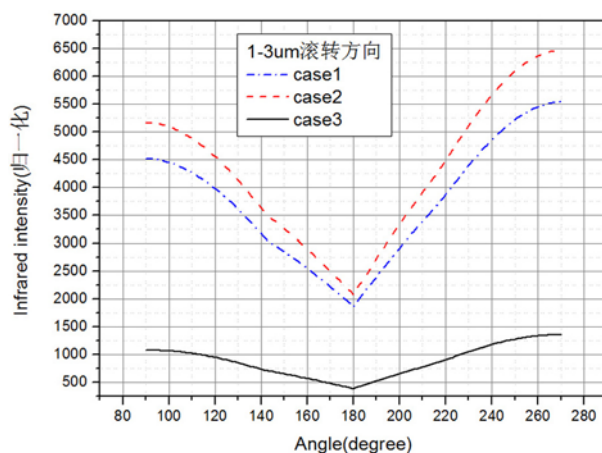


图 8 单位立体角内辐射能量随探测入射角的变化曲线

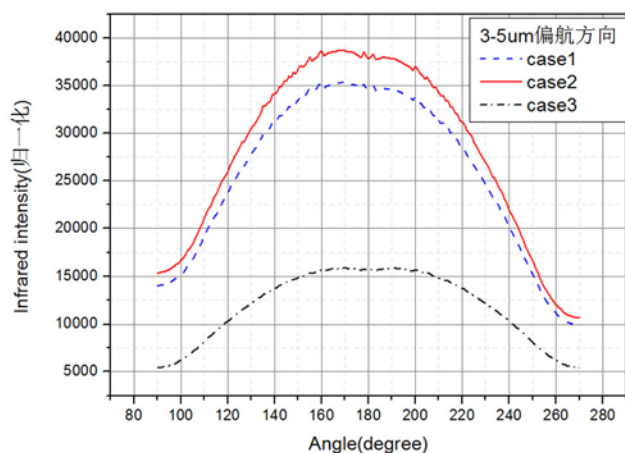


图 9 单位立体角内辐射能量随探测入射角的变化曲线

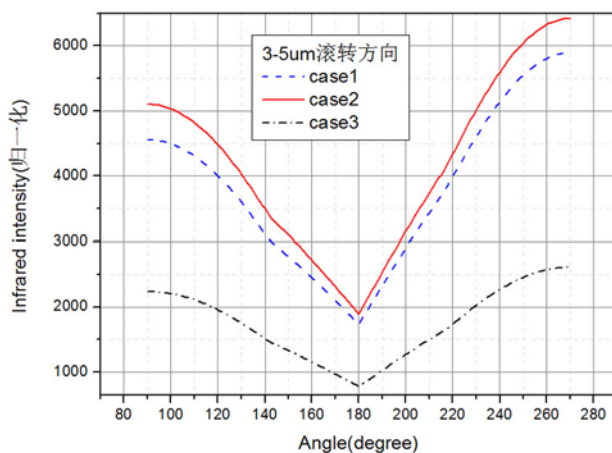


图 10 单位立体角内辐射能量随探测入射角的变化曲线

算稳定快; 未获得较为准确的辐射强度, 目标外形越复杂, 所需要的反射次数就越多; 对于外形复杂、反射率为 0.2 的目标, 一次反射就能稳定, 而当反射率提高到 0.6 时, 至少需要三次反射才能稳定。图 6 所示为乘波体外形目标的辐射

亮度比与反射次数之间的关系。

2 典型复杂目标的红外辐射特性计算

本文采用 LOS+OpenGL 法对大气层内具有典型升力体外形的高动态目标的红外辐射特性

进行了计算。该目标的表面温度场约为 1000 ~ 2000 °C, 表面发射率为 0.8; 流场状态有三种 (对应于 case1 ~ case3), 分别对应于 40 ~ 60 km 高度内的从低到高的 3 个高度区间, 其马赫数分别为 11 Ma、16 Ma 和 21 Ma; 计算波长分别为 1 ~ 3 μm 和 3 ~ 5 μm 。图 7 ~ 图 10 给出了单位立体角内的辐射能量随探测入射角的变化曲线 (辐射能量已归一化)。其中, 探测入射角是在目标体坐标系 OXYZ (同箭体坐标系^[5]) 下定义的。图 7 和图 9 中, 探测方向在 OXZ 面内变化, 探测入射角的定义为探测方向与 OX 的夹角; 图 8 和图 10 中, 探测方向在 OYZ 面内变化, 探测入射角的定义为探测方向与 OY 的夹角。整个计算过程耗时 3 h 左右, 而在采用传统算法时, 计算时长约为 20 h。

从计算结果中可以看出, 在短波波段和中波波段, 三种状态下的红外辐射变化趋势是一致的; 而在同一波段, 由于飞行高度和速度不同, 气动加热和表面温度也不同, case3 状态下的红外辐射最低, case2 状态下的红外辐射最高。在偏航方向上, 各状态在偏航角向 180° 接近时的投影面积不断增加, 因此在 180° 方向附近辐射值出现波峰。在滚转方向上, 90° 对应于自顶向下探测, 270° 对应于自底向上探测。由于迎风面

的温度高于背风面, 270° 方向上的辐射能量大于 90° 方向; 在侧视方向上, 投影面积小于迎风面和背风面的投影面积, 因此在 180° 方向附近辐射值出现波谷。

3 结束语

本文提出的 LOS+OpenGL 法充分发挥了 LOS 法在计算目标方向辐射特性方面的优势以及 OpenGL 软件接口在图形运算方面能力较强的特点。针对具有复杂外形及流场结构的大气层内飞行目标, 该方法解决了复杂外形相互遮挡以及表面与表面间、表面与流场间的耦合辐射问题, 大大提高了计算效率。最后, 通过计算机仿真数据验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [2] 胡兰芳. 高速飞行器非平衡绕流及光辐射特性模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] 徐根兴. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [4] 林妍. 大气层内高超声速飞行器光辐射特性建模 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] 陈克俊, 刘鲁华, 孟云鹤. 远程火箭飞行动力学与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

(上接第 6 页)

参考文献

- [1] 龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 18-24.
- [2] Chrzanowski K. Testing Thermal Imagers: Practical Guidebook [M]. Warsaw: Military University of Technology, 2010.
- [3] 苗丽峰, 徐茜, 张明涛, 等. 基于 ACTEL FPGA 短波红外成像系统设计与研究 [J]. 红外技术, 2008, 30(11): 621-625.
- [4] 庄严. 320×256 制冷型红外高灵敏度成像硬件研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [5] 张滢清, 王建宇, 傅雨田. 细分采样叠加技术在推扫式长波红外成像中的应用 [J]. 量子电子学报, 2006,

25(2): 263-267.

- [6] Xie B R, Zhao L C, Fu Y T. An LWIR Imaging System with Low Noise Characteristic Based on CMOS TDI Detector [C]. Proceedings of IEEE ICSP2010, 2010, 10: 413-416.
- [7] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 32(12): 3147-3153.
- [8] 曲宏松, 张叶, 金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1896-1903.
- [9] 刘雄飞, 邓强华. 基于 FPGA 的 DVB-ASI 信号接收的实现 [J]. PLD CPLD FPGA 应用, 2010, 4: 127-129.