

梯度温度气体介质的热辐射传递特性研究

安永泉^{1,2}, 赵 剡¹, 许 东¹, 刘浩伟¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要:高速导弹光学窗口外存在激波层,为高度不均匀的梯度温度气体介质,针对其中的热辐射传递开展一种有效数值求解方法研究.基于离散传递法思想,利用光线传输模型寻找导引头探测口径内的视线路径,推导出激波层的热辐射强度计算模型,并研究此模型所得激波层热辐射噪声与来流参数之间的关系,给出经验公式.结果表明,对于3~8 μm红外波段,激波层热辐射噪声在大气层内受飞行高度影响很小,与马赫数关系密切.

关键词:辐射传递;热辐射;数值模拟;梯度温度

中图分类号:TK124, O435 **文献标识码:**A

Thermal emission properties of gas medium with nonlinear temperature distribution

AN Yong-Quan^{1,2}, ZHAO Yan¹, XU Dong¹, LIU Hao-Wei

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The shock layer of high-speed missiles is composed of gas medium with highly uneven temperature distribution. A model for the radiative heat transfer in this layer was developed. With the method of discrete transfer and the model of light transmission, the heat radiation strength of the shock layer was calculated by the line of sight along the seeker detectors. The relations between the shock wave thermal radiation noise and flow parameters were also analyzed and the empirical formula is given. The results showed that for 3~8 μm infrared band, the thermal radiation noise and the Mach number is closely related. The radiation alters very little with the change of flight height (in atmosphere).

Key words: radiative transfer; thermal emission; numerical simulation; graded temperature

PACS: 44.40.+a

引言

高速导弹光学窗口外存在的激波层会引起气动热辐射效应,已成为制约高速空空导弹应用红外成像制导技术,实现精确打击的关键问题^[1],需要对梯度温度气体介质的热辐射传递特性进行深入研究.

高温气体辐射特性计算方法基本上可分为逐线计算、谱带模型和总体模型三类^[2].逐线计算准确,但需知道分子气体每条谱线的详细光谱特性参数,计算量大,一般作为检验其它模型准确度和有效性的基准解^[3];在一定谱带间隔内,将普朗克函数看

作常数,实际吸收系数用窄或宽谱带的平均值来代替,从而得到窄谱带和宽谱带模型^[4].若只关心全波谱或某段波谱的辐射强度和辐射热流分布,可用整体光谱辐射特性直接计算,即总体模型.总体模型有基于谱线的灰气体加权和模型(SLR)、假想气体吸收分布函数模型(ADFFG)、全光谱k分布模型(FSk)等几种模型^[5].

根据高速导弹光学头罩前视窗口外的激波层特性^[6],采用灰气体加权和模型(Weighted Sum of Gray Gases Model, WSGGM)的思想,将其辐射特性用三种等效灰气体代替,对每种灰气体单独进行辐射计算,乘以适当的加权因子相加得到总辐射量;在

收稿日期:2010-07-09,修回日期:2011-04-06

Received date: 2010-07-09, revised date: 2011-04-06

基金项目:国家自然科学基金(61074184,60878051);航空基金(20090151006)

作者简介:安永泉(1976-),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要从事气动光学、红外与辐射等方面的研究, E-mail: anyongquan107@hotmail.com.

目标涉及的特定红外波段范围内,以离散传递法求解辐射传递方程,得到激波层介质辐射特性.

1 物理模型

图 1 所示为采用前视窗口的红外成像制导导弹头部,关注圆内部分. 探测窗口采用凹窗结构,光学系统孔径为 60 mm × 60 mm 的方形. 以导弹光学头罩中心为三维对称的中心点,选取脱体的弓形激波到导弹头罩物面之间,紧贴探测窗口的,尺寸为 $DX \times DY \times DZ$ 的长方体流动介质. 其内温度、折射率分布分别为 $T(x,y,z), n(x,y,z)$ ^[7]. 介质与环境的界面是镜反射半透明界面. 对于在三维空间任意连续分布的温度 $T(x,y,z)$,难以直接求解辐射的弯曲路径. 为此将温度场进行离散.

按照计算流体力学方法得到的流场流动参数信息,把三维介质离散为 $X \times Y \times Z (64 \times 80 \times 64)$ 个网格,每个网格的尺寸为 1 mm × 1 mm × 1 mm,如图 2 (a)所示. 图中坐标轴 Z 代表导弹飞行方向的反向(流向), Y 坐标为法向, X 坐标为展向. 沿导弹光学头罩中心,即正激波中心展向方向取截面,如图 2 (b).

原始数据分析得知,对于所截取的驻点附近的正方体激波层介质,其温度结构为梯度分布,见图 3. 当网格分辨率较高时,将网格内的媒质温度设定为一阶函数,假定其他物性各向均匀;当辐射能在网格之间的界面传递时,只考虑它的折射或全反射,虽然与热辐射在阶跃界面处的传递不相符,但符合热辐射在梯度温度介质内的传递特点^[8].

介质离散将对光线穿过三维流场的分析转化为依次穿过一系列具有不同温度的介质单元的分析;同时将辐射传递方程在微元体半球空间的热辐射求解简化为垂直于每个边界网格面元的均匀谱带辐射强度的求解.

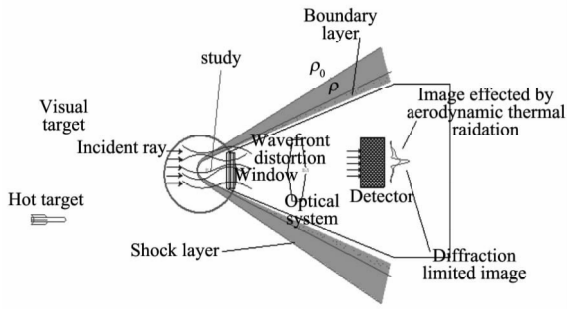


图 1 前视成像制导导弹气动热辐射效应
Fig. 1 Aero-dynamic thermal radiation effects of forward-looking imaging guided missile

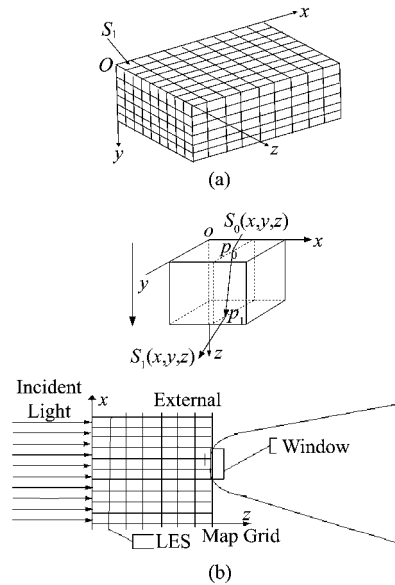


图 2 激波介质图 (a)三维 (b)二维
Fig. 2 Shock media (a)three dimensional (b)two dimensional

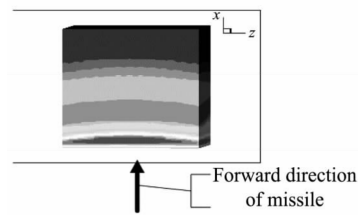


图 3 激波温度分布
Fig. 3 Temperature distribution in the shock layer

2 光线追迹与辐射路径

图 4 中,设网格单元(正方网格)大小为 d ,节点 1-1 处对应的温度为 T_{11} ,节点 $i-j$ 处温度为 T_{ij} . 1-1 节点与 2-1 节点间的界面以上网格温度由网格上、下左节点的温度值确定 $T_{11}(z) = (T_{21} - T_{11})z + T_{11}$,界面下网格内的温度取 $T_{21}(z) = (T_{31} - T_{21})z + T_{21}$, z 为导弹行进反方向.

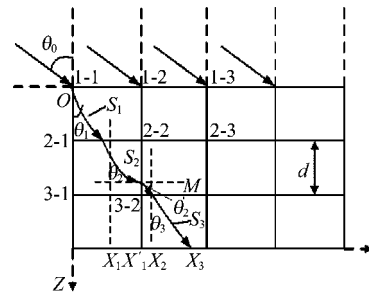


图 4 不均匀温度介质的光线追迹
Fig. 4 Ray tracing in media with uneven temperature distribution

设携能光线初始入射角为 θ_0 , 通过节点 1-1 后辐射传递轨迹切线方向与传递方向间的夹角为 θ_1 , 第 k 次 (k 定义为光 (辐射) 传递轨迹 z 方向改变次数) 传递时对应切向角为 $\theta_k^{[9]}$, 第 k 个拐点处对应的坐标为 $(x, x(z))$. 令 Δx_k 表示光线平移量 $\Delta x_1 =$ 线段 $X_1O, \Delta x_2 =$ 线段 $X_2X_1, \dots, \Delta x_k =$ 线段 X_kX_{k-1} , 用

$$\sum \Delta x_k = \sum_{i=1}^k x_i(z) \quad (1)$$

表示光线的总的实际偏移量.

其中 $x_i(z)$ 为每个网格单元中的光线方程, 是 z 的函数, 对于三维 (x, y, z) 网格中的光线方程, 变成沿 z 方向的一维方程. 如图 5 所示.

对于图 5 所示的一维梯度温度介质, 得到光线方程 $x = x(z)^{[10]}$ 为

$$x(z) = \int_0^z \frac{T(0)T(z)\sin\theta_0 + \delta_0 T(z)\sin\theta_0}{\sqrt{(T^2(0) + T^2(z))(1 - \sin^2\theta_0) + 2\delta_0 T(0)T(z)(T(0) - T(z)\sin^2\theta_0) + \delta_0^2(T^2(0) - T^2(z)\sin^2\theta_0)}} dz \quad (2)$$

其边界条件为 $x(0) = 0, x'(0) = \tan\theta_0$. 式中 $\delta_0 = T_0(n_0 - 1), T_0$ 和 n_0 为参考状态空气温度和折射率. $T(0)$ 为界面 1 ($z=0$) 处介质的温度.

当 $T(0) > \frac{\delta_0 T(z)\sin\theta_0}{T(z) + \delta_0 - T(z)\sin\theta_0}$ 时, 方程 $x(z)$ 恒有解, 若以点 $(0, x(0))$ 处为原点, 光线在 x 方向移动 $|x(z)|$ 距离, 通过判断 $|x(z)|$ 是否大于 1 mm , 可确定下一个格网单元;

当 $T(0) < \frac{\delta_0 T(z)\sin\theta_0}{T(z) + \delta_0 - T(z)\sin\theta_0}$ 时, 方程 $x(z)$ 无解, 光线在到达点 $(z, x(z))$ 之前被全反射, 光线不能到达界面 2 处;

当 $T(0) = \frac{\delta_0 T(z)\sin\theta_0}{T(z) + \delta_0 - T(z)\sin\theta_0}$ 时, 从界面 1 发出的光线到达点 $(z, x(z))$ 被全反射回界面 1.

当规定网格内温度函数 $T_i(z) = (T_{i+1} - T_i)z +$

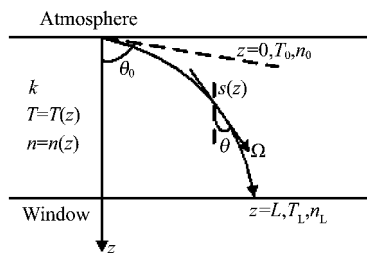


图 5 光线沿 z 方向传递轨迹示意图
Fig. 5 Light passing along the z direction

T_i 时, 得到了光线偏移量 $x_i(z)$ 的解析表达式.

$$x_{i+1}(z) = \frac{1}{T_{i+1} - T_i} \left(\frac{1}{1 - m_i} \sqrt{f(z)} \right) \left(\frac{m_0}{\sqrt{(1 - m_i)^3}} \ln \left| \frac{2(1 - m_i)(T_{i+1} - T_i)z}{+2(T_i + m_0 - T_i m_i) + 2\sqrt{1 - m_i} \sqrt{f(z)}} \right| - \zeta_i \right) \quad (3)$$

$$\sin\theta_{i+1} = \frac{x_{i+1}(z)}{\sqrt{1 + x_{i+1}^2(z)}} \quad (4)$$

式(3)中 $m_0 = T_0(n_0 - 1), T_0$ 和 n_0 分别为所研究微波外大气的平均温度和折射率, $m_i = \left(\frac{m_0}{T_i} + 1\right)^2 \sin^2\theta_i, f(z) = (1 - m_i)(T_{i+1} - T_i)^2 z^2 + 2(T_{i+1} - T_i)(T_i + m_0)z + (T_i + m_0)^2,$

$$\zeta_i = \frac{1}{T_{i+1} - T_i} \left(\frac{1}{1 - m_i} \sqrt{f(T_i)} \right) \left(\frac{m_0}{\sqrt{(1 - m_i)^3}} \ln \left| \frac{2(1 - m_i)(T_{i+1} - T_i)T_i}{+2(T_i + m_0 - T_i m_i) + 2\sqrt{1 - m_i} \sqrt{f(T_i)}} \right| \right)$$

如果 $\sum \Delta x_k > l \times d (l \in N$ 为计数值, 用于标定所追击光线是否超出给定的 CFD 数据网格范围, 超出即表示计算无效), 则对偏移量 $\sum \Delta x_k$ 进行修正.

3 红外谱带辐射强度

3.1 辐射传递轨迹

以点 $(0, x(0))$ 处为原点, 由式(2)得出点 $(z, x(z))$ 在辐射轨迹上的坐标为:

$$s(z) = \int_0^z \frac{(T(0)T(z) + \delta_0 T(0))}{\sqrt{(T^2(0) + T^2(z))(1 - \sin^2\theta_0) + 2\delta_0 T(0)T(z)(T(0) - T(z)\sin^2\theta_0) + \delta_0^2(T^2(0) - T^2(z)\sin^2\theta_0)}} dz \quad (5)$$

由式(5)得出, 从辐射轨迹上点 $(z_i, x(z_i))$ 到达另一点 $(z_{i+1}, x(z_{i+1}))$ 的光线行程长度为

$$\delta_{s(i+1)}(z) = \frac{1}{T_{i+1} - T_i} \left(\frac{1}{1 - m_i} \sqrt{f(z)} \right) \left(\frac{m_i m_0}{\sqrt{(1 - m_i)^3}} \ln \left| \frac{2(1 - m_i)(T_{i+1} - T_i)z}{+2(T_i + m_0 - T_i m_i) + 2\sqrt{1 - m_i} \sqrt{f(z)}} \right| - \zeta_i \right) \quad (6)$$

式(6)中

$$\xi_i = \left(\frac{1}{1-m_i} \sqrt{f(T_i)} \right) \left(\frac{1}{T_{i+1}-T_i} - \frac{m_i m_0}{\sqrt{(1-m_i)^3}} \ln \left| \frac{2(1-m_i)(T_{i+1}-T_i)T_i}{+2(T_i+m_0-T_i m_i)+2\sqrt{1-m_i}\sqrt{f(T_i)}} \right| \right) \quad (6)$$

θ_i 为辐射轨迹上点 $(z_i, x(z_i))$ 处的切向极角。

规定网格内温度函数,即得到辐射特征射线在控制体单元网格中的行程 δ_s 的解析表达式。

3.2 离散传递法

离散传递法的基本思想是沿着某根特征射线求解辐射传递方程。从每个边界网格面元的节点向半球空间引出 $N_l(N_l = N\theta \times N\psi)$ 条特征射线,每条特征线都由引出点经过半透明介质到达另一界面,如图 6 所示。

辐射强度对角度的依赖性使辐射问题复杂化的关键因素^[12]。因为研究目标最终服务于气动热辐射退化图像的复原,选定 LOS(Line Of Sight)路径为沿 CFD(Computational Fluid Dynamics) 网格计算时的辐射积分路径。

设由界面 1 发射的一根特征射线 $s(z)$ 进入单元网格控制体 (i, j) 时的谱带辐射强度为 $I_{i,j}$,离开该控制体的谱带辐射强度为 $I_{i,j+1}$,见图 6。

沿射线在控制体 (i, j) 上积分辐射传递方程直至最终到达界面 2,忽略散射,射线穿过控制体时谱带辐射强度的变化为^[11]。

$$I_{i,j+1} = I_{i,j} \exp(-\kappa_k \delta_{s(j)}) + \frac{B_{k,T_{i,j}} \sigma(T_{i,j} + \delta_0) T_{i,j}^4}{\pi} [1 - \exp(-\kappa_k \delta_{s(j)})] \quad (7)$$

其中 $\delta_{s(j)}$:特征射线在控制体 (i, j) 中的行程, $T_{i,j}$:控制体 (i, j) 的温度; $B_{k,T_{i,j}}$: $T_{i,j}$ 温度下 $\Delta\lambda_k$ 谱带内黑体辐射能占总辐射能的份额。

$$B_{k,T_{i,j}} = \int_{\Delta\lambda_k} E_{b\lambda}(T_{i,j}) d\lambda \int_0^\infty E_{b\lambda}(T_{i,j}) d\lambda$$

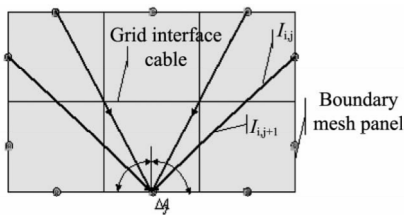


图 6 离散传递的计算模型
Fig. 6 Calculation model of discrete transfer

$$= \int_{\Delta\lambda_k} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_{i,j})]} d\lambda \int_0^\infty \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_{i,j})]} d\lambda \quad (8)$$

其中 $\Delta\lambda_k$ 为高速导弹制导红外成像涉及的 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 中远红外波段。

4 结果与讨论

联立式(1)到式(4),得到光线追迹 LOS 路径的 CFD 网格递推算法。

联立式(5)到式(8),得到激波热辐射沿 LOS 路径的红外谱带辐射强度和光程差的 CFD 网格递推算法。其中激波层非灰气体采用灰气体加权和模型 WSGGM 描述。其模型参数,即灰吸收系数和相应的权值,由逐线计算的光谱数据库 HITRAN 获得。分别计算 N 、 O_2 、 CO_2 三种组分^[13]的 $I_{i,j+1}$,加权求和得到 $\sum I_{i,j+1}$ 。

跟据以上两种计算模型可得到前视制导导弹光学头罩窗口外的激波热辐射噪声。

文中取不同高度、飞行马赫数 (M_a) 的流场数据 (12 组源数据) 进行仿真计算。

图 7 为 $M_a = 5, H = 30 \text{ km}$, 入射角分别为 $\theta_0 = 5^\circ, \theta_0 = 15^\circ$, 从 $x = 0 \sim 64, z = 0$ 入射,经激波层后在光学头罩窗口外形成 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 红外波段的热辐射噪声。沿 x 轴方向分布:

图 8(a) 为高度不同 ($H = 30 \text{ km}, 40 \text{ km}$), 马赫数相同 ($M_a = 5$), 入射角 ($\theta_0 = 5^\circ$) 相同时的热辐射噪声。图 8(b) 为网格单元温度被指定为常数时的计算结果,几乎分辨不出高度变化时热噪声的变化。

图 9 为马赫数不同 ($M_a = 5, M_a = 7$), 高度相同 ($H = 30 \text{ km}$), 入射角 ($\theta_0 = 5^\circ$) 时的热辐射噪声。

图得出,在现有流场实验数据前提下,在 $3 \sim 8$

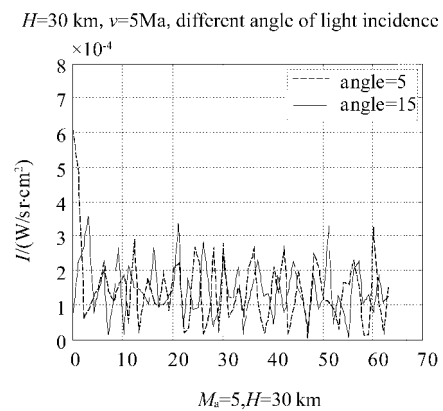


图 7 不同光线入射角的热辐射噪声
Fig. 7 Thermal radiation noise of different angle of incidence

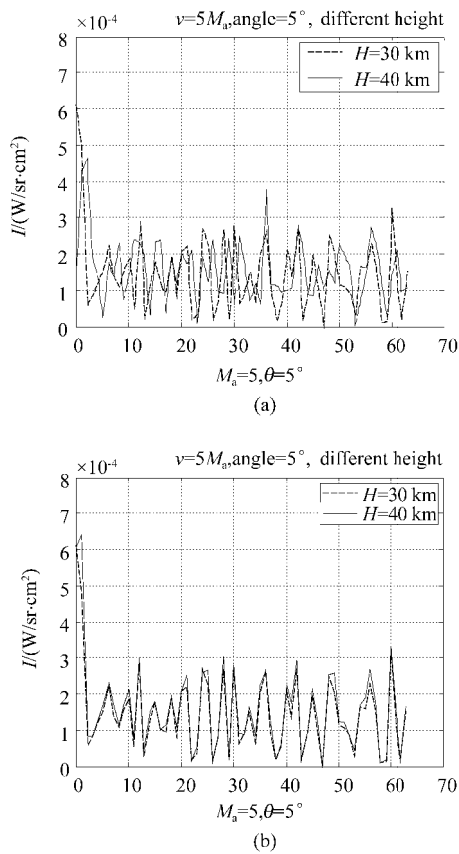


图8 不同高度的热辐射噪声 (a)单元温度为函数 (b)单元温度为常数

Fig. 8 Thermal radiation noise of different heights (a) temperature as function (b) temperature as constant

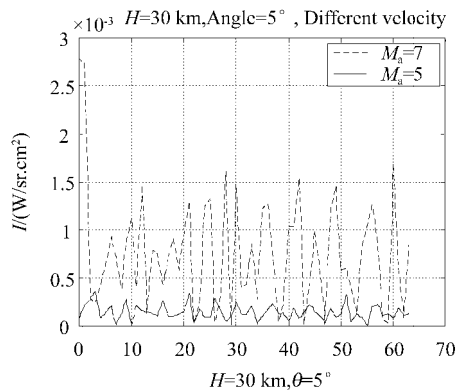


图9 不同飞行速度的热辐射噪声

Fig. 9 Thermal radiation noise of different flight speeds

μm 波段,热辐射噪声对飞行速度(马赫数)的变化最为敏感。

由 12 组数据得到热辐射平均强度与马赫数的关系为

$$\bar{I}_{5^\circ} = 0.6067 \times 10^{-5} H^3 + 3.956 \times 10^{-5} H^2 - 7.048 \times 10^{-5} H + 3.84 \times 10^{-5} \quad (9)$$

当其它条件固定,马赫数增大,热辐射噪声也明显增大。

当流场条件一定时,光线入射角改变,热辐射噪声的辐射强度平均值基本不变 $\bar{I}_{5^\circ} = 1.4497 \times 10^{-4}$, $\bar{I}_{15^\circ} = 1.4280 \times 10^{-4}$,如图 7,但在窗口的分布不同;当导弹速度相同,飞行高度变化时,热辐射噪声辐射强度和分布均改变不大,如图 8, $\bar{I}_{30 \text{ km}} = 1.4497 \times 10^{-4}$, $\bar{I}_{40 \text{ km}} = 1.6747 \times 10^{-4}$ 物理事实是 30 km 高空和 40 km 高空的空气密度的区别没有达到“大气”与“稀薄大气”的质的区别,结论符合实质规律。

5 结论

为研究前视制导导弹光学头罩窗口外激波层的气动光谱热辐射效应,发展热辐射噪声的精确递推计算模型。热辐射定量计算的复杂度在于辐射积分路径的选取,基于所研究的是对制导用红外图像产生干扰的热辐射噪声,选取 LOS 路径作为辐射强度积分路径;利用辐射离散传递思想,推出温度梯度介质的热辐射传递定量解算方法,得到了特定波段精确的激波热辐射噪声。据此模型可进行气动热辐射抑制技术研究,减小或避免高温气体红外热辐射对导引头红外探测器成像的干扰,分析气动热辐射效应对导引头探测目标信噪比的影响。

REFERENCES

- [1] Jumper E J, Recent advances in aero-optics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, **37**(3): 299-399.
- [2] YIN Xue-Mei, LIU Lin-Hua, A survey of models for the calculation of radiation characteristics of high temperature gases[J]. *Journal of engineering for thermal energy and power* (尹雪梅,刘林华,高温气体辐射特性计算模型.热能动力工程), 2007, **22**(5): 473-479.
- [3] FEI Jin-Dong, Study on aero-optical effect technology for high speed missile infrared image guide[J]. *Infrared and Laser Engineering* (费锦东,高速导弹红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求.红外与激光工程), 1998, **27**(1): 42-44.
- [4] ZHAO Yong-Peng, Each group element radiation mechanisms and spectral radiation of high temperature gas at different temperature[C]. *Research Collection of aero-optical effects mechanism for imaging detection high-speed missile* (赵永蓬,高温气体各组分不同温度的辐射机制与光谱辐射.高速导弹成像探测气动光学效应机理研究文集), 2004: 70-74.
- [5] FU Yuan-Gang, Simulation of air flow and thermal radiation using direct simulation of MONTECARLO method[D]. *Master thesis, Harbin Institute of Technology* (付元刚,气动热辐射的直接蒙特卡罗法模拟,硕士学位论文,哈尔滨工业大学), 2007.
- [6] ZHANG Ya-Ping, Study of optical transmission of the high-

- speed aircraft optical window in aerodynamic environment [D]. *Doctor thesis, Harbin Institute of Technology* (张亚萍. 在气动热环境下高速飞行器光学窗口的光传输特性研究. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学), 2007.
- [7] SHAN Yong, ZHANG Jing-Zhou. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor[J]. *J. Infrared Millin. Waves* (单勇, 张靖周. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2): 95-99.
- [8] HUANG Yong, WANG Jun. Thermal emission properties of a two dimensional medium with nonlinear refractive index distribution[J]. *J. Infrared Millin. Waves* (黄勇, 王浚. 二维非线性梯度折射率的热辐射特性研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(1): 38-41.
- [9] WANG Tao, ZHAO Yan. Numerical study of evaluating the optical quality of supersonic flow field[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(23): 5545-5551.
- [10] XIA Xin-Lin, HUANG Yong. Radiative transfer inside a linearly graded index semi-transparent slab; gray substrate wall and specular semi-transparent surface[J]. *J. Infrared Millin. Waves* (夏新林, 黄勇, 灰壁面与镜反射界面下线性折射率半透明平板内的辐射传递. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(3): 185-188.
- [11] XIA Xin-Lin, Ai Qing. Analysis on the transient temperature-fields for infrared radiation of aircraft skin[J]. *J. Infrared Millin. Waves* (夏新林, 艾青. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 174-177.
- [12] QIU Jin-Huan, Lv Da-Ren. Research progress of modern atmospheric physics [J]. *Chinese Journal of atmospheric sciences* (邱金桓, 吕达仁, 现代大气物理学研究进展. *大气科学*), 2003, **27**(4): 628-643.
- [13] ZHANG Jie. Mathematical modeling and calculation of aerodynamic thermal radiation of high-speed flowfield [C]. *Research collection of aero-optical effects mechanism for imaging detection high-speed missile* (张杰. 高速流场气动热辐射数学建模与计算. *高速导弹成像探测气动光学效应机理研究文集*), 2004: 75-83.
- [14] WANG Sheng-Gang. Spectral radiation model of high temperature gas for specified band [D]. *Master thesis, Harbin Institute of Technology* (王圣刚. 高温气体特定波段光谱辐射模型, 硕士论文, 哈尔滨工业大学).
- [15] YANG Jun-Yan, SHEN Fei. Influence on the performance of staring infrared imaging system due to its temperature variation [J]. *Infrared and Laser Engineering* (杨俊彦, 沈飞. 凝视红外成像系统温度变化对其性能的影响. *红外与激光工程*), 2008, **37**(6): 487-489.
- [16] Liepmann H W. Deflection and diffusion of a light ray passing through a boundary layer [R]. Report SM-14397, Douglas Aircraft Company, Santa Monica Division, 1952.
- [17] Troler J, Hudson D, Carlson D, et al. Shock layer radiance effects on endoatmospheric interceptor seeker performance [C]. In AIAA and SDIO, Annual Interceptor Technology Conference, Huntsville, AL 1992.
- [18] ZHOU Ping-Cheng. Numerical simulation of aerothermal calculation of hypersonic vehicle [J]. *J. Huangzhong univ. of Sci. & Tech* (周平成. 高超音速飞行器头罩气动热流场数值模拟. *华中科技大学学报*), 2006, **34**(1): 50-52.

(上接 309 页)

- [7] Johnson H, Graham M. *High-speed digital design: a handbook of black magic* [M]. Beijing: Pub. House of Electronics Industry, 2003.
- [8] Huang D, Wang Y, Zhang L, et al. High resolution multi-channel voltage reference generator for experiments on quantum-dot devices [C]. In *ICEM Conference I*, Beijing, 2009 1-513-16.
- [9] ZHEN Yu-Feng, WANG Yong-Gang. The arbitrary data generator for IRFPA test system [J]. *Nuclear electronics and detection technology*. (郑裕峰, 王永钢. 红外焦平面阵列测试的任意数据发生器. *核电子学与探测技术*), 2007, **27**(4): 697-700.

(上接 365 页)

- Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D10): 21077-21090.
- [6] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, **9**(1): 161-173.
- [7] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**(2-3): 213-224.
- [8] QI Shu-Hua, WANG Chang-Yao, NIU Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index [J]. *Journal of Remote Sensing* (齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被干旱指数 (TVDI) 进行全国旱情监测研究. *遥感学报*), 2003, **7**(005): 420-427.
- [9] SUN Wei, WANG Peng-Xin, HAN Li-Juan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data [J]. *Transactions of the CSAE*, (孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善. *农业工程学报*), 2006, **22**(002): 22-26.
- [10] CHEN Yan-Hua, ZHANG Wan-Chang. Evaluating effects of vegetation types on temperature vegetation drought index (TVDI) in the Heihe oasis region [J]. *Remote Sensing technology and application* (陈艳华, 张万昌. 植被类型对温度植被干旱指数 (TVDI) 的影响研究——以黑河绿洲区为例. *遥感技术与应用*), 2007, **22**(006): 700-706.
- [11] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**(4): 434-440.