

文章编号: 1000-8055(2012)08-1867-07

# 姿控发动机羽流的可见光/近红外特性

柯维娜, 朱定强, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘 要:** 为了研究发动机羽流辐射特性对光学探测成像的影响, 基于不同直径粒子散射理论、辐射传递方程和分子吸收线数据库, 应用有限体积法, 建立了火箭发动机羽流在不同波段的辐射特性计算程序。针对实际工作情况进行建模, 开展某姿控发动机工作在环月球轨道时的可见及近红外波段羽流的辐射特性计算。在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  波长范围内, 针对羽流气体组分、波长、观察天顶角以及太阳辐射对羽流光谱的影响作了数值计算及分析。研究结果表明: 应用有限体积法开发的程序较好地模拟火箭发动机羽流的辐射特性, 并具有广泛适用性; 在可见光和近红外波段, 太阳辐射作用对火箭发动机喷流辐射特性影响最大。

**关 键 词:** 辐射特性; 羽流; 瑞利散射; 有限体积法; 光谱辐射亮度

**中图分类号:** V435.14

**文献标志码:** A

## Visible/near infrared radiation characteristics of attitude-control engine exhaust plume

KE Wei-na, ZHU Ding-qiang, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to study the plume radiation effects on optical detecting and imaging, based on the scattered theories of different diameter particles, the radiation transition equation and the database of molecular absorption lines, a program using the finite volume methods was developed to simulate the plume radiation characteristics in variable wave bands. Modeling the actual working conditions, the visible and near infrared radiation characteristics of attitude control engine plume working in lunar orbit was computed. In  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$ , the effects of composite gas component, the wavelength, the detected zenith and the solar incidence on the plume radiation were simulated and analyzed. The result shows that the program based on finite volume methods can simulate the plume radiation characteristic accurately and be applied diffusely; solar radiation is the greatest influential factor of plume radiation in the visible and near infrared wave band.

**Key words:** radiation characteristics; plume; Rayleigh scattering; finite volume method; spectral radiance

应用在航天领域的火箭发动机, 由于采用的推进剂种类不同, 发动机羽流的组分也不完全相同, 由于发动机用途的不同, 羽流的辐射量级有所区分。发动机喷流的主要成分总体可归结为高温

混合燃气、固体颗粒和烟雾等 3 种成分, 其中喷流的红外波段辐射占主要部分, 紫外和可见光辐射能量所占比例较小<sup>[1]</sup>。在外太空环境中探测仪器的视场以及光学敏感元器件受到污染主要来源于

收稿日期: 2011-08-24

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120830.1200.201208.1867\\_027.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120830.1200.201208.1867_027.html)

作者简介: 柯维娜(1983—), 女, 河北赤城人, 博士生, 主要从事目标辐射特性研究。

搭载平台动力系统所产生的羽流<sup>[2]</sup>,探测器除接收到目标自身的辐射外,还能接收到羽流辐射以及目标表面对太阳辐射的反射能量。因此,准确计算羽流的光谱辐射特性是进行目标探测研究的重要组成部分。国内对喷流的红外辐射特性研究较多<sup>[3-6]</sup>,但随着深空探测活动的推进,基于可见光和红外波段的组合探测应用越来越广泛<sup>[7-9]</sup>,对目标光学特性提取的精度要求也越来越高,因此多波段羽流辐射特性研究成为必要组成部分。

计算羽流的辐射特性的数值方法有 Monte Carlo 法、射线寻踪法、流模型、离散坐标法、有限体积法(FVM)等,每一种方法都有一定的适用范围<sup>[10]</sup>。本文应用基于 FVM 开发的火箭发动机羽流在可见及红外波段辐射特性的计算程序,在考虑太阳辐射对羽流辐射特性的影响基础上,计算了姿控发动机羽流在 0.4~0.9 μm 光谱内的辐射特性。相对比之前的发动机羽流辐射特性研究主要关注喷流的辐射热效应,本文主要分析并获得了太阳辐射对羽流辐射特性的影响,更关注羽流辐射的空间分布和光谱分布特性,并简单分析了羽流辐射对于月球探测中光学探测的影响。

## 1 FVM 法的数学模型

根据辐射传输方程,考虑非灰体介质的吸收、发射、散射过程,在选定的火箭发动机羽流计算区域内,沿方向  $s$ ,经过路程长度  $dx$  的辐射传递方程<sup>[10]</sup>可以写成

$$\frac{dI_k(x,s)}{dx} = -\beta_k I_k(x,s) + \kappa_k \cdot I_{bk}(x) + \frac{\sigma_{sk}}{4\pi} \int_{\Omega_i=4\pi} I_k(x,s_i) \Phi_k(s_i,s) d\Omega_i \quad (1)$$

其中  $k$  表示谱带模型区域,  $I_k(x,s)$  表示空间位置  $x$ 、传输方向  $s$  上谱带  $k$  内的辐射强度,  $\beta_k$  表示介质的谱带衰减系数,  $\kappa_k$  表示介质的谱带吸收系数,  $\sigma_{sk}$  表示介质的谱带散射系数,  $\Phi_k(s_i,s)$  为散射相函数,  $\Omega$  为立体角。

采用有限体积法研究羽流辐射的空间分布时,需要对计算域进行空间位置离散和立体角离散,将计算域划分为若干互不重叠的控制体积以及立体角,典型的控制体如图 1 所示。

在控制体  $V_P$  和控制角  $\Omega^m$  内对吸收、发射、散射的非灰体介质的辐射传递方程积分,则得到在  $V_P$  和  $\Omega^m$  内辐射能量守恒方程的有限体积表达式

$$\int_{\Omega^m} \int_{A_c} I_{k,c}^m(s^m \cdot n_j) dA_c d\Omega^m = \int_{\Omega^m} \int_{V_P} G dV d\Omega^m$$

$$G = -\beta_k I_k^m(x) + \kappa_k I_{bk}(x) + \frac{\sigma_{sk}}{4\pi} \int_{\Omega^l=4\pi} I_k(x,\Omega^l) \Phi_k(\Omega^m,\Omega^l) d\Omega^l \quad (2)$$

其中  $I_{k,c}^m$  表示控制体环表面第  $m$  个立体角的谱带辐射强度单位为  $(W/(sr \cdot m^2)) \cdot \mu m^{-1}$ ,  $A_c$  控制体环表面积,  $s^m$  方向矢量,表示第  $m$  个立体角的中心,  $n_j$  控制体外表面单位法矢量。

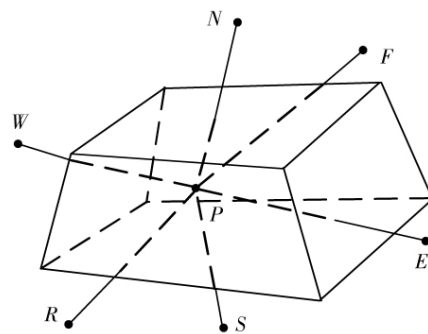


图 1 流场中典型的控制体

Fig. 1 Typical control volume in the flow field

假设在每一个立体角内,控制体光谱辐射亮度相等,近似由位于控制体内节点  $P$  上的值表示;控制体各表面上的辐射强度各自相等,近似由位于控制体各表面中心处的积分点上的值表示,则将式(2)的连续积分转换为数值积分,计算式如下:

$$\sum_{j=1}^{M_c} Q_{k,j}^m = \sum_{j=1}^{M_c} A_{c,j} I_{k,c,j}^m D_j^m \approx -\beta_{k,P} I_{k,P}^m V_P \Omega^m + \left[ \kappa_{k,P} I_{bk,P} + \frac{\sigma_{sk,P}}{4\pi} \sum_l I_{k,P} \Phi_k(\Omega^m,\Omega^l) \Omega^l \right] V_P \Omega^m \quad (3)$$

其中  $M_c$  表示控制体环表面的数量,  $Q_{k,j}^m$  表示在立体角内由第  $j$  面上离开该控制体的谱带辐射能量,  $D_j^m$  表示方向权值。

$$D_j^m = \int_{\Omega^m} (s^m \cdot n_j) d\Omega^m$$

$$s^m = i \sin \theta \cos \psi + j \sin \theta \sin \psi + k \cos \theta$$

$$n_j = i n_{x,j} + j n_{y,j} + k n_{z,j} \quad (4)$$

利用阶梯格式的空间差分格式将控制体表面上的辐射强度与控制体中心的辐射强度关联起来,有

$$I_{k,c,j}^m = I_{k,P}^m \quad D_j^m > 0 \quad (5)$$

令反照率  $\omega_k = \sigma_k / (\kappa_k + \sigma_k)$ , 下标  $j = E, W, S, N, R, F$  代表与控制体  $P$  相邻的各控制体的中心节点,如图 1 所示,则方程可写为

$$a_{k,P}^m I_{k,P}^m = \sum_{j=E,W,S,N,R,F} a_j^m I_{k,j}^m + b_{k,P}^m \quad (6)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} a_{k,P}^m &= \sum_{j=E,W,S,N,R,F} \max[A_j D_j^m, 0] + \\ &(\kappa_{k,P} + \sigma_{xk,P}) V_P \Omega^m \\ a_j^m &= \max[-A_j D_j^m, 0] \\ b_{k,P}^m &= [(\kappa_k + \sigma_{xk}) S_k^m]_P V_P \Omega^m \\ S_k^m &= (1 - \omega_{k,P}) \frac{\sigma B_{k,T_P} T_P^4}{\pi} + \\ &\frac{\omega_{k,P}}{4\pi} \sum_l I_{k,P}^l \Phi_k(\Omega^m, \Omega^l) \Omega^l \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中  $B_{k,T_P}$  表示  $T_P$  下  $\Delta\lambda_k$  谱带内的黑体辐射能占总辐射能的份额。

对于羽流气体辐射特性,属于半透明介质和透明截面条件,对应的边界条件为

$$I_0^+(x, \theta, \varphi) = I_0(x, \theta, \varphi) \quad (8)$$

对于离散后位于边界单元网格,则

$$I_{k,c,f}^m = I(x, \theta, \varphi) \quad (9)$$

其中  $I_{k,c,f}^m$  边界单元网格外边界面上的  $m$  方向辐射强度,  $m$  方向的空间立体角为  $(\theta, \varphi)$ 。

## 2 介质的辐射特性

羽流辐射的主要来源是高温气体和粒子团的

$$\begin{aligned} \frac{g_V(\nu - \nu_0)}{I_{gVmax}} &= \left(1 - \frac{W_l}{W_V}\right) \exp\left[-2.772 \left(\frac{\nu - \nu_0}{W_V}\right)^2\right] + \left(\frac{W_l}{W_V}\right) \cdot \left[1 + 4 \left(\frac{\nu - \nu_0}{W_V}\right)^2\right]^{-1} + \\ &0.016 \left(1 - \frac{W_l}{W_V}\right) \left(\frac{W_l}{W_V}\right) \times \left\{ \exp\left[-0.4 \left(\frac{\nu - \nu_0}{W_V}\right)^{2.25}\right] - 10 \left[10 + \left(\frac{\nu - \nu_0}{W_V}\right)^{2.25}\right]^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $g_V(\nu - \nu_0)$  表示 Voigt 线型函数,  $W_l$  表示洛伦兹谱线的全线宽,  $W_V$  表示 Voigt 线型谱线的全线宽,  $I_{gVmax}$  表示谱线中心处 Voigt 线型函数的值,  $\nu_0$  表示计算域内谱线中心处的波数,  $\nu$  表示计算波数,各参数具体计算方法及公式参见文献[12]。

以分子光谱数据库<sup>[11]</sup>为基础,采用逐线积分法计算气体光谱吸收系数,得到在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  波段内对于发动机喷流气体成分,有吸收谱线的气体成分是  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , 其中  $\text{H}_2\text{O}$  具有较强吸收特性,几个相对较强的吸收峰值主要集中在  $0.59, 0.65, 0.73, 0.81 \mu\text{m}$  波段附近,  $\text{H}_2\text{O}$  的吸收系数曲线如图2所示。

### 2.2 散射理论

当光束穿过透明介质时,由于介质组分的不均匀性将产生光的散射;对于十分纯净的液体或气体,由于分子热运动造成密度的局部涨落也能产生比较微弱的散射效应。针对火箭发动机羽流

自身辐射、吸收以及对太阳辐射的散射。火箭羽流的温度对应于气体分子的振动-振动激发温度,因此,气体分子的辐射和吸收光谱表现出振动-转动波段的特性。在可见光和近红外波段范围内,喷流中粒子团对太阳辐射的散射作用很强,同时该波段包含太阳光谱辐射最强的区域,而由于羽流喷流温度而产生的自身红外辐射最强波段区域并不在本次研究的波段内,因此在研究时需要多方面考虑,进行对比分析不同作用在羽流辐射中的作用效果。

### 2.1 气体分子吸收特性

气体辐射精确计算的基础是确定气体的光谱吸收系数,气体的辐射光谱是由一根根谱线组成。作为气体光谱辐射的最基本单元,谱线具有一定的宽度,引起谱线变宽的原因有碰撞(压力)增宽,多普勒(Doppler)增宽和自然增宽<sup>[10]</sup>。本文计算高度是在环月球轨道,忽略自然增宽影响,并应用 Voigt 线型考虑了压力增宽和 Doppler 增宽的混合效应,有文献[11]研究指出利用近似计算式代替精确的 Voigt 线型函数的复杂的无穷积分运算,误差不超过 2%,近似计算式为

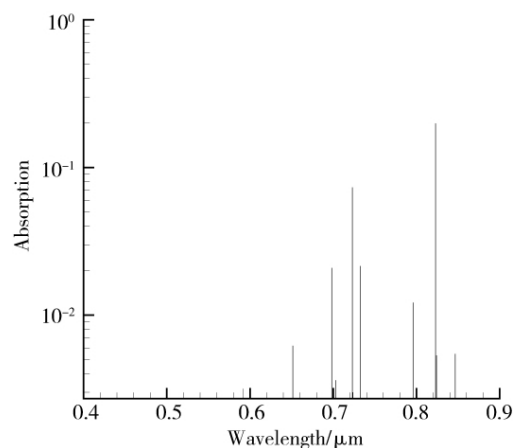


图2 水蒸气吸收系数

Fig. 2 Absorption coefficient of vapor

研究介质,存在高温混合气体分子组分分布的不均匀性,对于固体发动机,推进剂中金属微粒密度分布不均匀对羽流辐射的产生起主导作用;对于液体火箭发动机,液滴团粒子数密度的分布不均

匀对羽流辐射的产生起主导作用,对于大推力液体发动机,碳颗粒是产生辐射的主要粒子,对于姿态轨控的小推力液体发动机,由于快速膨胀而产生的浓缩液滴密度分布不均匀是产生散射辐射的主要原因。

研究中一般假定发动机羽流中的粒子形状为球形. 研究球形粒子散射问题,一般应用非偏振平面电磁波投射均质球形粒子时得到 Maxwell 方程远场解的 Mie 散射公式,其中定义尺度参数为

$$\chi = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (11)$$

其中  $D$  为粒子直径,  $\lambda$  为入射波长. 当  $\chi \ll 1$  时,属于瑞利散射范畴。

根据文献[13]可知液体火箭发动机由于快速膨胀产生的液滴平均直径为  $0.06 \mu\text{m}$ , 本文研究的发动机工作在高真空状态, 气体分子直径在  $10^{-10} \text{ m}$  量级, 符合瑞利散射适用范围. 由散射相函数, 如图 3, 可知前向和后向散射最强, 散射极小值时的散射角为  $90^\circ$  和  $270^\circ$ 。

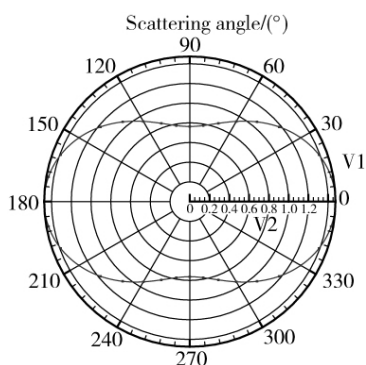


图 3 散射相函数分布图

Fig. 3 Distribution map of scattering phase function

### 2.3 太阳辐射条件

通常计算中将太阳辐射等效为温度为  $5900 \text{ K}$  黑体点光源辐射. 根据普朗克黑体辐射定律, 太阳的光谱辐射出射度  $M(\lambda)$  为<sup>[10]</sup>

$$M(\lambda) = c_1 / \{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]\} \quad (12)$$

其中  $c_1, c_2$  分别为第一和第二辐射常数.  $T$  为太阳的等效辐射黑体的温度. 在可见光和近红外波段太阳辐射强度如图 4 所示。

对于羽流研究对象, 太阳辐射以平行光方式入射, 计算中认为太阳所发出的总辐射通量在空间方向上分布均匀, 则太阳的光谱辐射亮度为

$$L(\lambda) = 4\pi R_s^2 M(\lambda) / 4\pi = R_s^2 M(\lambda) \quad (13)$$

其中  $R_s$  为太阳半径。

研究环月轨道上的太阳辐射, 可认为传输损耗忽略不计, 则距太阳中心  $l_0$  处光谱辐射亮度为<sup>[14]</sup>

$$L_s(\lambda) = L(\lambda) / l_0^2 \quad (14)$$

在太阳照射的羽流气体表面, 太阳入射到气体边界表面能量为

$$I_0^+(x, \theta, \varphi) = L_s(\lambda) \cos \alpha \quad (15)$$

其中  $\alpha$  为太阳入射方向和表面法向的夹角。

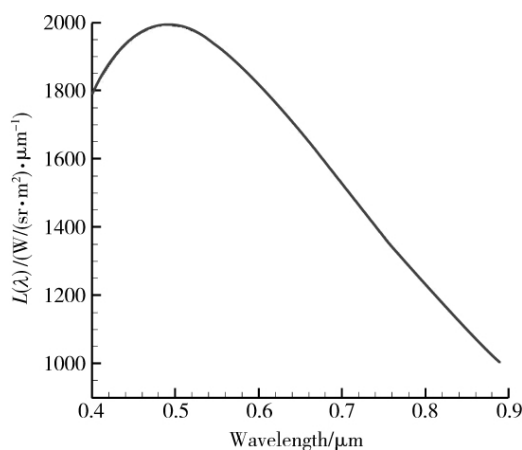


图 4 太阳入射光谱辐射亮度

Fig. 4 Curve of solar incident spectral radiance

### 3 发动机羽流辐射强度计算

姿控发动机工作于高真空状态, 羽流流场分布沿喷管轴线为轴对称分布, 因此计算区域选择形状为轴对称圆柱形, 即可满足羽流流场特点, 也能保证计算精确度, 同时节约计算资源。

本文计算火箭发动机羽流辐射特性的计算域为直径为  $4 \text{ m}$ , 高度为  $5 \text{ m}$  圆柱形, 流场参数和几何形状是轴对称分布. 计算域的选取根据流场的温度、压强和密度分布情况, 在满足计算域选取不影响结果正确性的情况下尽可能减少计算域尺寸, 以保证网格划分质量. 圆柱形计算域的一个底面的圆心位于发动机喷管出口平面与喷管对称轴的交点处, 同时定义该交点为计算坐标区域原点, 沿喷流流动方向定义为  $x$  轴正向, 为方便计算, 同时考虑计算域的特性, 定义太阳入射方向通过圆点的为计算坐标  $y$  轴, 与太阳入射方向相反为  $y$  轴正向, 然后依照右手定则确定计算域的  $z$  轴. 各几何参数定义如图 5 所示。

羽流场参数沿羽流轴向和径向变化如下图 6 至图 8 所示. 在流场内垂直于轴线方向作 20 个等距离间隔的横截面, 沿半径方向作 36 个等圆周角间隔的切平面, 以轴线方向为同心轴作 12 个等间隔的圆柱面, 将全空间  $4\pi$  立体角分为  $18 \times 36$  个

离散立体角. 文献[10]指出, FVM 计算方法存在假散射效应, 采用阶梯格式不会产生物理上不真实的

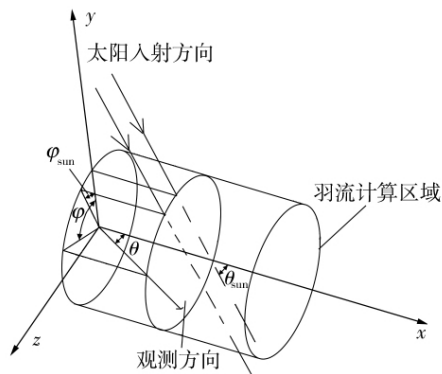


图5 太阳入射方向及羽流几何关系示意图

Fig. 5 Geometric relation schematic diagram of solar incident direction and plume

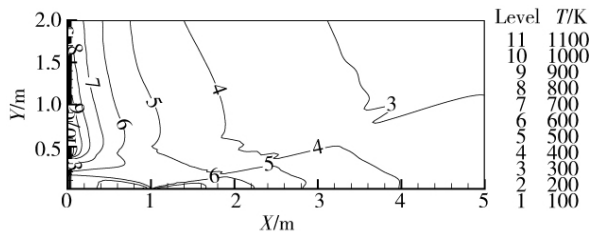


图6 羽流流场温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of plume

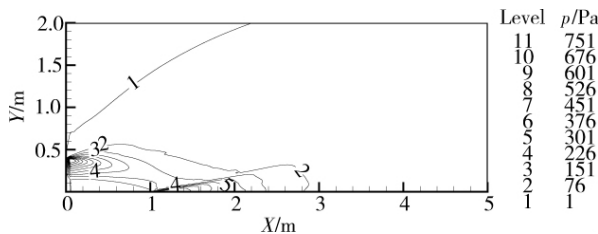


图7 羽流流场压强分布

Fig. 7 Pressure distribution of plume

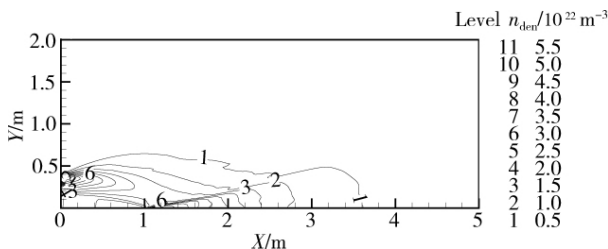


图8 羽流流场数密度分布

Fig. 8 Molar concentration distribution of plume

负辐射强度, 但网格的划分影响结果分布的均匀性. 计算域参数和控制体的划分均符合轴对称特

点, 但由于太阳入射的方向性, 使得在相同轴向位置和径向位置, 不同圆周方向的控制体的光谱的空间分布不同, 因此在太阳照射情况下必须采用三维计算流场. 为便于进行羽流自身和太阳入射时辐射特性对比, 本文分别针对二维和三维两种情况开展羽流自身辐射仿真计算, 同时应用三维流场进行太阳入射时羽流辐射分布仿真计算.  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  光谱区间被均匀分为 50 个相等的光谱间隔, 在计算获得每个光谱区间内, 每个控制体在每个控制角内的光谱辐射强度  $i'_\lambda$  基础上, 火箭发动机羽流在一定光谱区间内沿某一方向的辐射强度则表示为

$$I = \sum_{j_\lambda=1}^{n_\lambda} \sum_{j_A=1}^{n_A} i'_\lambda \cos \theta \Delta A \Delta \lambda \quad (16)$$

其中  $n_A$  是固体火箭羽流计算边界上控制体表面的总数,  $\Delta A$  是控制体表面的面积,  $\theta$  是控制体表面的外法线与计算方向的夹角.

## 4 计算结果

本文计算了一台液体燃料姿控发动机的二维轴对称羽流在光谱  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  的可见及近红外辐射特性. 发动机工作高度为绕月球轨道. 在现有的文献报道中关于可见光及近红外波段的辐射特性研究很少, 但本文所用程序在计算红外波段辐射特性经过试验测量验证, 因此推及可见光及近红外波段也具有工程指导意义.

根据计算结果可知, 二维和三维计算程序针对羽流自身辐射特性计算结果相同. 但二维轴对称计算消耗的计算资源相对比三维计算大幅缩小. 将研究的羽流视为点目标, 则在立体空间角度  $4\pi$  内羽流气体自身辐射和在太阳垂直照射情况下的辐射强度分布如图 9 和图 10 所示. 由两图对比可知, 羽流气体在没有太阳照射情况下的辐射相对比太阳照射情况下辐射可以忽略. 在没有太阳辐射时, 羽流自身定向辐射强度分布在赤道平面最强, 而当有太阳照射时, 在太阳照射的前进方向上羽流的定向辐射强度最强.

改变太阳入射方向, 对羽流辐射进行仿真研究可知, 当太阳入射方向不同时, 羽流计算区域内的最大不同, 随太阳入射角成正弦规律变化. 当太阳辐射垂直入射时, 产生羽流最大, 如图 11 所示.

图 12 给出了在太阳辐射垂直羽流气体对称轴线入射, 对应于研究波段的羽流光谱辐出度. 同时分析图 2 和图 4, 可知综合太阳辐射光谱出射度入射和羽流气体吸收散射共同作用, 羽流气体

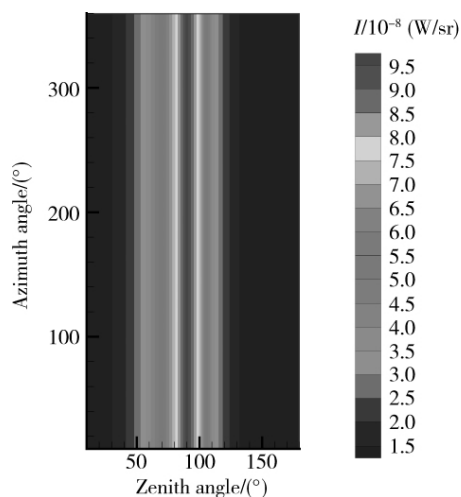


图 9 羽流流场定向辐射强度分布

Fig. 9 Directional radiation intensity distribution of plume

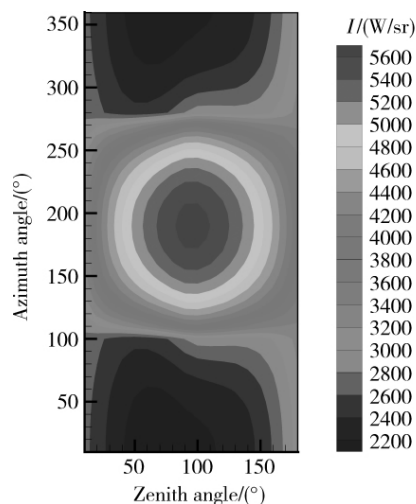


图 10 羽流流场太阳辐照时定向辐射强度分布

 $(\theta_{\text{sun}} = 90^\circ, \varphi_{\text{sun}} = 0^\circ)$ 

Fig. 10 Directional radiation intensity distribution of plume when solar incidence

 $(\theta_{\text{sun}} = 90^\circ, \varphi_{\text{sun}} = 0^\circ)$ 

在可见光和近红外波段的光谱辐出度随波长先增大,在  $0.7 \mu\text{m}$  处达到最大然后略有减小.

根据文献[15]研究表明:月表太阳辐照度的变化范围在  $1311.3 \sim 1423.1 \text{ W/m}^2$  之间,文献[16]指出月面的太阳反照率为  $0.127 \pm 0.021$ . 由此计算可知,在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  波段内月球表面的平均有效辐射强度为  $55.90 \text{ W/(sr} \cdot \text{m}^2)$ ,无太阳照射时羽流自身辐射远小于该数量级. 根据探测器探测视角、太阳、月球表面和羽流的相对关系,计算若干不同相对位置的太阳辐照条件下羽流辐射亮度,由结果可知,如在太阳辐照条件下在针对

月球进行探测时,需要选择合适的空间位置,避免羽流辐射对月球探测的影响. 某一位置的羽流投影视图如图 13 所示.

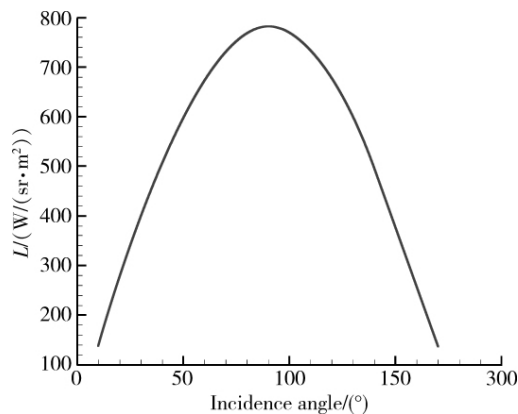


图 11 不同太阳入射方向对应的羽流最大辐射亮度

Fig. 11 Maximum radiance of plume with different solar incident directions

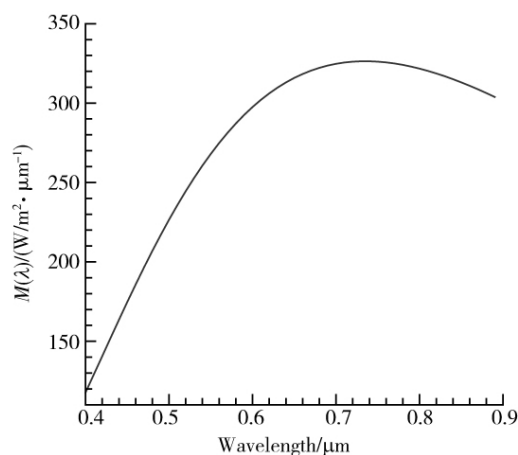


图 12 太阳垂直入射时羽流的光谱辐出度

Fig. 12 Spectral radiant exitance of plume with solar vertical incidence



图 13 某相对空间位置羽流辐射亮度投影图

Fig. 13 Projection of plume radiance for one relative space position

## 5 结 论

本文在给定流场及辐射物性参数条件下,运用 FVM 计算液体火箭发动机羽流在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  波段的辐射特性. 计算结果表明:在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  太阳入射对喷流辐射强度影响最大,其次为液滴的散射效应,喷流自身辐射可忽略不计.

当不考虑太阳入射时,喷流的辐射亮度随波长的增加;当考虑太阳入射时,喷流辐射亮度随波长的增加先增大后减小,最大值在  $0.7 \mu\text{m}$  左右,这是太阳辐照和液滴散射的共同作用结果.

喷流辐射亮度随太阳入射角的增加而增大,在太阳垂直喷流轴线入射情况下达到最大. 并且喷流辐射亮度随观测视角变化而变化,当观测角度与太阳入射方向相同时,观测的羽流辐射亮度最小,而当观测角度与太阳入射方向相反时,羽流辐射亮度最大. 在进行空间探测活动中,应该选择合适的空间位置,确保探测工作顺利正确开展.

## 参考文献:

- [1] Plastinin Y, Karabadzha G, Khmelinin B, et al. Ultraviolet, visible and infrared spectra modeling for solid and liquid-fuel rocket exhausts[R]. AIAA 2001-0660, 2001.
- [2] 焦子龙. 卫星整星分子污染数值模拟技术研究[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2010.  
JIAO Zilong. The study on numerical simulation method of molecular contamination of satellite[D]. Beijing: China Academy of Space Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] 聂万胜, 杨军辉, 何浩波, 等. 液体火箭发动机尾喷焰红外辐射特性[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 91-94.  
NIE Wansheng, YANG Junhui, HE Haobo, et al. The IR radiation characteristic of exhaust plume of the liquid rocket engine[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(5): 91-94. (in Chinese)
- [4] 范传新. 固体火箭羽焰的辐射特性及其温度测量技术述评[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 238-241.  
FAN Chuanxin. Review on radiation characteristics and temperature measurement techniques for exhaust flames of solid rocket[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(3): 238-241. (in Chinese)
- [5] 樊士伟, 张小英, 朱定强, 等. 用 FVM 法计算固体火箭羽流的红外特性[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 793-797.  
FAN Shiwei, ZHANG Xiaoying, ZHU Dingqiang, et al. Calculation of the infrared characteristics of the solid rocket plume with FVM method[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 793-797. (in Chinese)
- [6] 张小英, 朱定强, 向红军, 等. 液体火箭喷焰红外特性的数值仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(11): 1250-1253.  
ZHANG Xiaoying, ZHU Dingqiang, XIANG Hongjun, et al. Numerical simulation of infrared characteristics of liquid rocket plume[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(11): 1250-1253. (in Chinese)
- [7] 林武文, 徐锦, 徐世录. 红外探测技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(9): 840-843.  
LIN Wuwen, XU Jin, XU Shilu. Development trend of IR detection technology[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(9): 840-843. (in Chinese)
- [8] 周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 68-73.  
ZHOU Yanping, SHU Rui, TAO Kunyu, et al. Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 68-73. (in Chinese)
- [9] 吴新宇, 陈拥军, 张华达, 等. 大视场激光探测与告警技术[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 5-7.  
WU Xinyu, CHEN Yongjun, ZHANG Huada, et al. Large field laser detection and warning technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(7): 5-7. (in Chinese)
- [10] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [11] Rithman L S, Gamache R R, Goldman A, et al. The Hitran database: 1986 edition[J]. Applied Optical, 1987, 26(19): 4058-4097.
- [12] 刘林华, 谈和平, 余其铮. 气体污染物的红外辐射特性[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(3): 251-255.  
LIU Linhua, TAN Heping, YU Qizheng. Infrared radiative properties of gas pollutants[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1999, 5(3): 251-255. (in Chinese)
- [13] LI Zheng, ZHONG Jiaqiang, Lecin D A, et al. Modeling of water vapor condensation in expanding plumes. [R] AIAA 2008-1185, 2008.
- [14] 沈锋, 姜文汉.  $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$  太阳辐射在大气中的传输计算[J]. 中国空间科学技术, 2006, 1(1): 21-26.  
SHEN Feng, JIANG Wenhan. Evaluation of ground spectrum characteristics and star magnitude of special object [J]. Chinese Space Science and Technology, 2006, 1(1): 21-26. (in Chinese)
- [15] 李雄耀, 王世杰, 程安云. 月球表面温度物理模型研究现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 480-485.  
LI Xiongyao, WANG Shijie, CHENG Anyun. A review of lunar surface temperature model[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(5): 480-485. (in Chinese)
- [16] 成珂, 张鹤飞. 月球表面温度的数值模拟[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1376-1380.  
CHEN Ke, ZHANG Hefei. Numerical simulation of the temperature of lunar surface[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1376-1380. (in Chinese)