发动机燃气喷流红外辐射场的数值模拟

詹 光 李椿萱

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在高温流动中热辐射与流场是耦合的,但在发动机燃气喷流流场的温度范围内可以在流场计算中忽略热辐射的影响,于是流场与辐射场的模型方程可解耦. 为此提出了模拟飞行器绕流流场红外辐射的解耦模型以及相应的算法. 该算法首先采用总变差减小 TVD(Total Variation Diminishing)格式对流场进行模拟,再引入有限体积概念,应用所取得的流场参数,在同一组网格上计算流场中的红外辐射特征. 以轴对称喷管内 N_2,O_2,CO_2,H_2O,CO,HCl,H_2 等 7 组分高度欠膨胀冻结流与均匀绕流干扰流场为算例进行了验证性的模拟计算,并与已有试验和计算数据进行了对比,表明该算法是可靠的,可在较大幅度地降低计算量的情况下给出满足工程需要的结果.

关 键 词: 红外辐射; 冻结流; 数值模拟

中图分类号: V 211.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)08-0829-05

Numerical computations of infrared signatures in exhaust flow fields of jet engines

Zhan Guang Lee Chunhian

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The thermal radiation field in a high temperature gas flow is coupled with the flow field. However, within the temperature range of the exhaust flow field for a jet engine, the thermal radiation effects can usually be ignored in the computations of the flow field, and the governing equations on the flow field and the radiation field can be decoupled. A decoupling model for computing infrared signatures of the flow fields surrounding the aircraft was proposed. A numerical procedure was constructed by first utilizing TVD(total variation diminishing) scheme to solve the interactive flow field. A finite volume formulation for the spectral intensity was imposed to estimate the total infrared signatures using the computed flow field data over the same set of grids. As a test case for validating the proposed numerical procedure, the infrared signatures in an interaction flow field of a uniformed external flow and a frozen exhaust flow with 7 species, N_2, O_2, CO_2, H_2O, CO, HCl, and H_2, were computed and compared favorably with the available experimental as well as numerical results.

Key words: infrared radiation; frozen flow; numerical simulation

飞行器发动机燃气喷流的红外辐射场是飞行器的重要辐射源. 精确模拟该高温气流的红外辐射信号对于空空、地空导弹的红外系统设计,红外隐身技术的研究,及卫星上的探测弹道式导弹的红外预警系统设计等均具有重要的意义.

为了精确模拟喷流的红外辐射信号,首先需

收稿日期: 2004-03-09

基金项目: 航天科技资金资助项目

作者简介: 詹 光(1979-),男,辽宁兴城人,硕士生, iceberg _ zg2001@ sina. com.

要精确给出喷流的流场参数. 飞行器发动机超音速喷流与飞行器绕流的相互作用可导致流场中出现强间断(激波和喷流/绕流间的剪切层)和弱稀疏波系. 这些强间断及稀疏波系的相互干扰在流场中形成了如马赫盘结构等复杂的波系结构. 对于这类流动的精确数值模拟需要非常精细的网格[1],同时由于喷流包含从高雷诺数的薄剪切层尺度到整个羽流尺度为特征的复杂流场,其标度变化范围大,必须具有可反映该特征的网格结构及足够的网格数量,以给出足够精确的流场及红外辐射计算结果及其重要特征[2]. 此外,真实的燃气喷流是一个多组分的非平衡化学反应流动,必须引入化学动力学计算. 因此,高精度模拟复杂飞行器尾部高温气流的红外辐射信号必须耗费大量机时.

为提高计算效率,本文尝试提出首先应用高精度模拟方法求解流场,再应用流场数据进行红外信号计算的方式对流场与热辐射进行解耦计算. 采用此类方法,热辐射模型的选用及算法对计算精度至关重要. 在此,辐射模型采用了 N_2,O_2,CO_2,H_2O,CO,HCl,H_2 等 7 组分的纯气体辐射输运方程[3]. 以下将首先给出本项工作所采用的数学模型及计算方法.

1 喷流流场计算

在高温流动中,热辐射与气体流动是耦合的,即流场中流体元的辐射强度依赖于流体元各个组分的局部密度与温度,而流体元的特征又受到辐射强度的影响. 但对于发动机燃气喷流流场,其温度一般小于 5 000 K,可以在流场计算中忽略热辐射的影响. 此外,燃气喷流实际上是一个多组分的化学反应非平衡流动. 考虑到当前飞行器发动机的燃烧效率均相当高,燃气喷流可视为多组分的冻结流. 于是,可以将流动方程与热辐射解耦,并假设所考虑的喷流/绕流干扰流场为冻结流.

以下给出多组分冻结流的数学模型.

1.1 基本方程

考虑由 N 种组分组成的混合气体的冻结流动. 采用层流假设,在笛卡儿坐标系下时间相关的守恒型 N-S 方程可写成

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_e^k}{\partial x_k} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_v^k}{\partial x_k} = 0 \tag{1}$$

式中

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \rho_s ; s = 1, \cdots, N \\ \rho u_j ; j = 1,2,3 \\ e \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}_e^k = \begin{bmatrix} \rho_s u_k ; s = 1, \cdots, N \\ \rho u_j u_k + p\delta_{jk} ; j = 1,2,3 \\ u_k (e + p) \end{bmatrix} \qquad k = 1,2,3$$

$$\boldsymbol{F}_v^k = \begin{bmatrix} \rho D_s \dfrac{\partial f_2}{\partial x_k} ; s = 1, \cdots, N \\ \tau_{kj} ; j = 1,2,3 \\ u_j \tau_{kj} + q_k \end{bmatrix} \qquad k = 1,2,3$$

其中,p 为压力;ρ_s(s=1,2,…,N)为各组分气体的密度;ρ 为混合气体的密度;u_k(k=1,2,3)为速度的 3 个坐标分量;e 为总能量;$f_s = \rho_s/\rho$ 为组分 s 的质量浓度.

引入 Stokes 粘性假设,粘性应力项可表达为

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_1}\right) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial u_j}\delta_{ij}$$

忽略辐射热传导,热通量可表示为

$$q_k = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_k} + \sum_{s=1}^{N} \rho D_s h_s \frac{\partial f_s}{\partial x_k} \quad k = 1,2,3$$

混合气体的粘性系数 μ 和热传导系数 λ 由 Wilke 半经验公式确定[4],单组分输运系数取自文献[5,6]. 组分的焓 h_s 由温度多项式拟合[5,7]. 扩散系数 D_s 为

$$\rho D_s = \frac{2(1 - f_s)\mu}{1 - X_s}$$

1.2 计算格式

数值模拟采用 Yee 的 TVD 显式格式[8],并引入速度相关的熵修正函数[4]

$$\varepsilon = \sigma\left(\sum_{k=1}^{3} \left| u_{i_k+1/2}^k \right| + c_{i_k+1/2}\right) \tag{2}$$

其中,u^k 为 x_k 方向上的速度分量;c 为当地音速;σ 为一可调参数,可取 0.125 ~ 0.5. 计算格式中采用了 Harten 限制器[9].

1.3 算例与边界条件处理

选用了文献[10]中辐射测试Ⅱ作为算例以验证本文所提出的算法. 试验喷管出口直径为 22.5 mm,计算域如图 1 所示. 为了减少计算量,取喷管的半模. 半模对称面边界由轴对称关系给出;壁面边界满足无滑移条件;而流场的外边界采

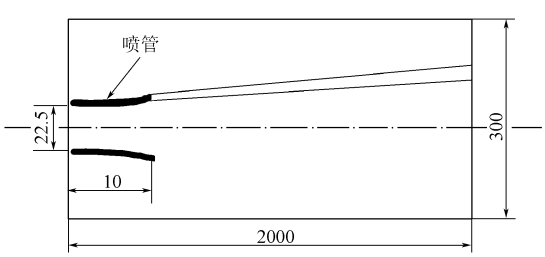


图 1 计算域示意图(单位:mm)

用 Jameson 提出的远场边界准一维特征分析方法来确定无反射边界条件.

2　热喷流流场红外辐射计算

在直角坐标系下,沿视线 $\boldsymbol{l}$ 同时具有发射、吸收作用的纯气体的辐射输运方程表示为[3]

$$\frac{\partial}{\partial l}N_\omega(\boldsymbol{l}) = -K_\omega(\boldsymbol{l})N_\omega(\boldsymbol{l}) + K_\omega(\boldsymbol{l})N_\omega^0 \quad (3)$$

其中,$N_\omega^0(\boldsymbol{l})$ 为等价于点处的黑体光谱辐射亮度;$K_\omega(\boldsymbol{l})$ 为气体总吸收系数. 方程两端同时乘以积分算子 $\exp\left(\int K_\omega(\boldsymbol{l})\,\mathrm{d}l\right)$,并沿路径从 $l_1 \to l_2$ 积分得

$$N_\omega(\boldsymbol{l}_2) = N_\omega(\boldsymbol{l}_1)\tau_\omega(\boldsymbol{l}_1,\boldsymbol{l}_2) - \int_{l_1}^{l_2} N_\omega^0(\boldsymbol{l})\,\frac{\partial}{\partial l}\tau^\omega(\boldsymbol{l},\boldsymbol{l}_2)\,\mathrm{d}l$$

定义　$\tau_\omega(\boldsymbol{l}_1,\boldsymbol{l}_2) = \exp\left(-\int_{l_1}^{l_2} K_\omega(\boldsymbol{l})\,\mathrm{d}l\right)$

为 $l_1 \to l_2$ 纯气体介质的光谱透射率. 对于喷流热流场,在某条视线的边界 l_1 处没有外界辐射 $N_\omega(\boldsymbol{l}_1)$,辐射方程可简化为

$$N_\omega(\boldsymbol{l}_2) = -\int_{l_1}^{l_2} N_\omega^0(\boldsymbol{l})\,\frac{\partial}{\partial l}\tau_\omega(\boldsymbol{l},\boldsymbol{l}_2)\,\mathrm{d}l \quad (4)$$

上式是纯气体红外辐射输运方程的基本解,反映了辐射源沿视线辐射到视点的光谱辐射能量. 而喷流热流场是扩展源,其压力、温度、组分浓度均为空间的函数,采用类似于有限体积的方法,将热流场化分为若干个小体积元,每个小体积元近似为点辐射源,则视点处所接收到的辐射能量应为所有小体积元产生的辐射的总和. 若视线的位置以球坐标表示(如图 2 所示),则将方程(4)的被积函数 $N_\omega^0(l)\dfrac{\partial\tau_\omega(\boldsymbol{l},\boldsymbol{l}_2)}{\partial l}$ 对整个包含热气体的空间积分即得视点($l=0$)方向的光谱辐射强度:

$$I_\omega = \int_{\theta_i}^{\theta_f}\int_{\phi_i}^{\phi_f}\int_0^L N_\omega^0\,\frac{\partial\tau_\omega}{\partial l}l^2\,\mathrm{d}l\mathrm{d}\phi\sin\theta\mathrm{d}\theta \quad (5)$$

其中,积分下、上限 θ_i,θ_f 为射线与微平面法线的夹角的范围;ϕ_i,ϕ_f 为射线的方位角范围.

将(5)式写成数值积分形式有

$$I_\omega = \sum_{\theta_i}^{\theta_f}\sum_{\phi_i}^{\phi_f}\sum_0^L \overline{N}_\omega^0[\bar\tau(l) - \bar\tau(l-\Delta l)]l^2 \times \sin\theta\Delta\theta\Delta\phi \quad (6)$$

其中,$\overline{N}_\omega^0$ 为 $(l-\Delta l)$ 到 l 站位的 N_ω^0 的平均值;$\bar\tau$ 为光谱间隔 $\Delta\omega$ 内的平均透射率. 喷流中平均光谱透射率的计算采用单线模型 SLG(Single Line Group)算法[3]. 计算中所需的所有光谱参数见文献[3],所需的流场参数由流场计算结果线性插值获得. 空间积分步长及视线间距由温度控制[3].

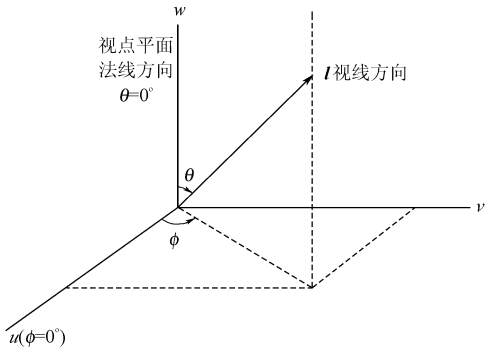


图 2　计算辐射坐标系

3　算例及结果分析

采用与文献[10]相同的模拟条件. 喷管出口及自由来流气体组分的摩尔含量如表 1 所示. 假设燃气喷流为冻结流,可不计及组分 O 和 OH,因此在实际计算中仅考虑 N_2,O_2,H_2O,CO_2,CO,H_2,HCl 等 7 个组分即可.

表 1　喷管出口及自由来流气体组分摩尔含量

组分	自由来流	喷管
H_2	0	0.055
O_2	0.211	0
H_2O	0	0.404
HCl	0	0.194
O	0	0
OH	0	0
N_2	0.789	0.1
CO	0	0.111
CO_2	0	0.136

在喷流红外辐射的计算中羽流远场特性更为重要. 为降低计算域的几何复杂程度而不影响算法及计算程序的通用性,在算例的计算中对喷管壁进行了简化处理:以径向两层网格代替伸入计算域内的喷管,但处于喷管位置上的网格点赋予壁面条件的值. 该处理可减少网格的总量,减少计算量.

计算网格采用代数生成,沿 (x_1,x_2,x_3) 为 $(119\times68\times15)$(x_1x_2 平面的计算网格如图 3 所示),最小网格尺度为(0.001 m×0.000 01 m). 计算时因子 σ 取 0.25. 喷口出流条件可由一维流动的估算获得:

速度 V_e=2 125 m/s

压力 P_e=288 kPa

温度 T_e=1 963 K

自由来流条件沿用了文献[10]测试Ⅱ的模拟条件:

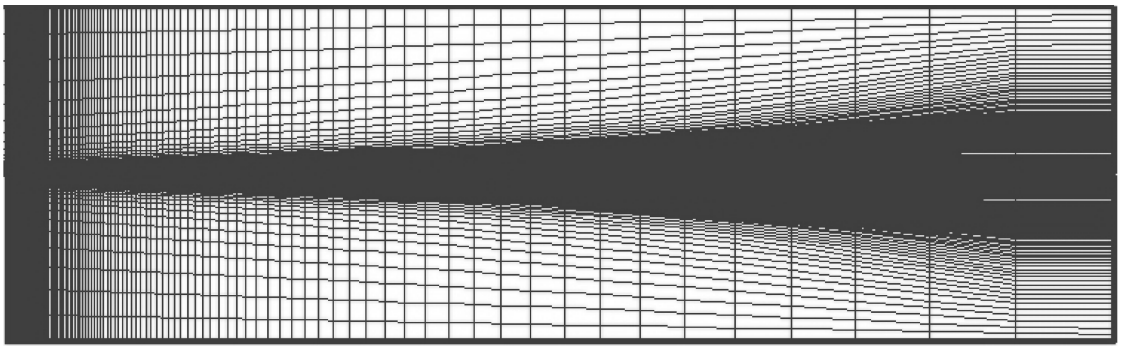


图 3 计算域网格

速度 $V_\infty = 68$ m/s

压力 $P_\infty = 101$ kPa

温度 $T_\infty = 288$ K

以上流场变量中的下标 e 表示喷管出口燃气的值；∞ 为自由来流的值.

由射流理论可知，当出口压力与环境压力之比 $n = P_e/P_\infty > 2$ 时喷流属高度欠膨胀流动，此时在射流的流场中将出现“马赫结构”型波系[11]. 本算例的计算结果也显示了该特性，其喷口近场的等马赫线及等温线见图 4、图 5. 由图 5 可以看到其温度分布与文献[10]采用 GASP 软件所计算出的温度云图完全吻合.

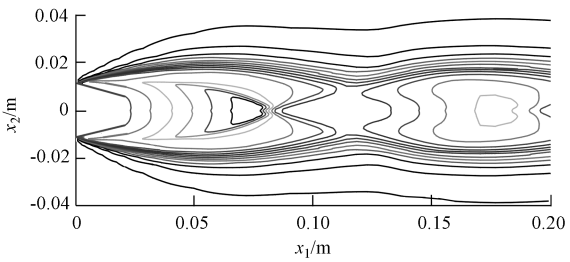


图 4 喷口近流场等马赫线分布

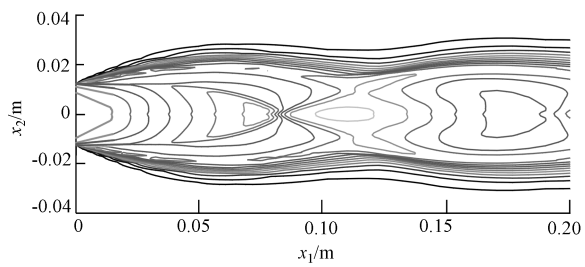


图 5 喷口近流场等温线分布

图 6 给出了沿喷管中心轴上的温度分布曲线. 可以看到，与文献[10]考虑化学反应的 GASP 计算所得的中心轴上的温度分布(文献[10]图 9)相对比，本文采用冻结流假设计算所得的结果在马赫盘位置的预测上是一致的；但在沿轴线上温度周期脉动的最大值与最小值均比文献[10]考虑化学反应的计算结果小约 150 K. 在非冻结流动中，H_2 与 CO 将与绕流空气中的 O_2 化合而释放出热量，在考虑冻结流时由于不出现该反应而导致温度场计算结果偏低.

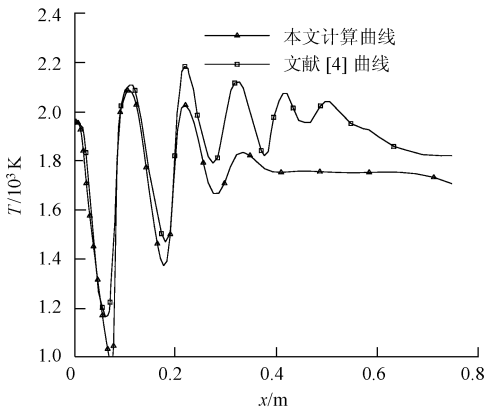


图 6 沿喷流轴上的温度分布

利用流场的计算结果作为起点可估算出喷流与绕流干扰流场的辐射信号. 图 7 给出了由喷口起始 1 m 长的喷流对垂直于喷流方向 9.4 m 处给定点的光谱辐射强度分布(其中计及 CO_2, H_2O, CO, HCl 等 4 种强辐射气体的辐射). 从图中可以看到各种气体组分对喷流辐射的贡献. 其中 CO_2 在波长 4.3 μm 附近存在强辐射带，在 2.7 μm 附近的强辐射是由 CO_2 和 H_2O 在此波长附近的强辐射带共同产生的. 该结果与文献[10]所给出的试验及计算光谱辐射强度分布(见文献[10]图 11)具有相同的特征和峰值位置. 但本文所给出的辐射强度在整体上约为文献[10]所示结果的 64%，两者的最大峰值比为 250/380.

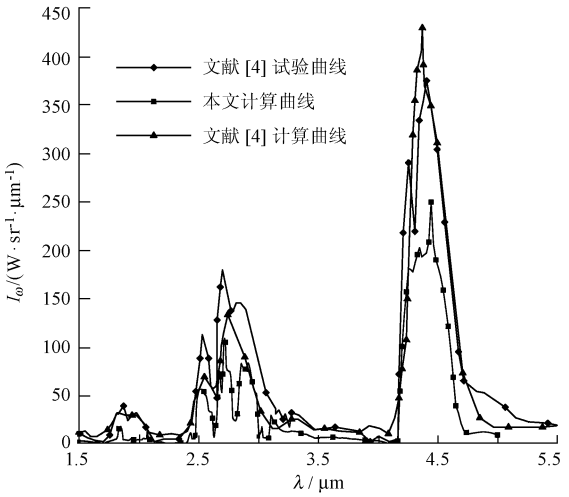


图 7　1 m 长喷流红外辐射光谱强度分布

如上所述,采用冻结流假设所得到的温度场要比考虑化学反应的计算结果小约 150 K. 若取平均温度 1 750 K 为参考量,则冻结流假设与考虑化学反应所估算出的温度场相差约 8.6%. 由于辐射与温度的 4 次方成正比,8.6% 的温度计算差值相当于辐射约为 34%,即本算例所给出的辐射相当于含化学反应辐射的 64%.

4　结 束 语

本文采用多组分气体的冻结流假设并忽略 Navier-Stokes 方程中的热辐射项的简化模型对喷流/绕流干扰流场的红外辐射特征进行了数值模拟研究. 计算采用显式 TVD 格式对给定外形喷管的喷流与绕流的干扰流动进行了数值模拟,再应用其流场参数对红外辐射强度进行离散积分求出其空间分布.

流场的计算结果与文献[10]考虑化学反应的计算结果相比,其误差不超过 10%. 与文献[10]的结果相对比,其喷流在 1.5 ~ 5.0 μm 波段间的红外辐射特征和峰值位置基本一致,表明本文所提出的计算模式可获得可靠的光谱辐射特征.

参考文献(**References**)

[1] 吴颂平, 李椿萱. 模拟无粘超音速射流/绕流干扰的高分辨率自适应网格数值方法[J]. 计算物理, 1991, 8(3): 235 ~ 242
Wu Songping, Lee Chunhian. An adaptive grid embedding technique with high resolution for numerical simulation of inviscid supersonic jet/external-flow interactions [J]. Comp phys, 1991,8(3): 235 ~ 242(in Chinese)

[2] Michael Wright J, Ram Rao M, Graham Candler V, *et al*. Modeling issues in the computation of plume radiation signature [R]. AIAA-98-3622, 1998

[3] Ludwing C B, Malkmus W, Reardon J E, *et al*. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. N73-27807, 1973

[4] Lee C H, Zheng B, Wu S P. Numerical computation of hypersonic flows over complex configuration [R]. AIAA-99-3687, 1999

[5] Yaws, Carl L. Chemical properties handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1999

[6] 张家荣,赵庭元. 工程常用物质的热物理性质手[M]. 北京: 新时代出版社,1987
Zhang Jiarong, Zhao Tingyuan. Thermal physical properties handbook of common engineering substance [M]. Beijing: New Times Press, 1987(in Chinese)

[7] 范作民,傅巽权. 热力过程计算与燃气表[M]. 北京:国防工业出版社, 1987
Fan Zuomin, Fu Xunquan. Thermal computation and combustion table [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987(in Chinese)

[8] Yee H C, Klopfer G H, Montagne J L. High-resolution shock-capturing schemes for inviscid and viscous hypersonic flows [J]. Comp Phys, 1990, 88: 31 ~ 61

[9] Zheng B, Lee C H. The effects of limiters on high resolution computations of hypersonic flows over bodies with complex shapes [J]. Comm Nonlin Sci Numer Simul, 1998, 3(2): 82 ~ 87

[10] Yaniv S, Cohen Y, Kanelbaum Y, *et al*. Comparison of calculated and measured radiation from a rocket motor plume [R]. AIAA-2001-0358, 2001

[11] 赵承庆,姜　毅. 气体射流动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998
Zhao Chengqing, Jiang Yi. Jetting gas dynamics[M]. Beijing: Beijng University of Science and Engineering Press, 1998(in Chinese)