兼容探测器效应的燃气红外特性计算宽带模型

李一涵[1],胡海洋[1],王　强[1],谢业平[2],邓洪伟[2]
(1.北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191;2.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:多尺度多线组宽带k分布(MSMGWB)模型能够精确而高效地求解红外辐射在强非均匀气体中的远程传输。为实现其对红外探测器光谱响应特性的兼容,引入等效光谱吸收率量化探测器保护窗口及CCD本身光电响应特性随入射波长的变化,并将其等效为环境空气中的虚拟气溶胶。结果表明:该算法能够与现有的MSMGWB模型兼容,结合其模型参数优化算法可获得良好的计算精度。碳氢燃料飞行器排气系统及其燃气喷流的远距离红外成像计算结果显示,在考虑和不考虑气溶胶影响的情况下,优化后的MSMGWB模型对红外探测器有效接收到的来自20/100 km外航空发动机排气系统的3~5 μm波段红外信号的最大相对计算误差小于9%,计算量仅为常用的统计窄带模型的1/4。

关键词:气体辐射;红外探测器;宽带模型;k分布模型;虚拟气溶胶;红外信号
中图分类号:V218　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.06.006

Wide-Band Model for Infrared Signature Calculation of Combustion Gas Compatible with Detector Effects

LI Yi-han[1], HU Hai-yang[1], WANG Qiang[1], XIE Ye-ping[2], DENG Hong-wei[2]
(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The multi-scale multi-group wide-band k-distribution model (MSMGWB) enables accurate and efficient solutions for long-distance transmission of infrared radiation in strong non-uniform media. In order to achieve its compatibility with the spectral response characteristics of infrared detectors, the equivalent spectral absorptivity was introduced to quantify the variations of the photoelectric response characteristics of the detector protection window and the CCD itself with the incident wavelength, and it is equivalently treated as virtual aerosols in ambient air. The results show that the algorithm is compatible with the existing MSMGWB model, and good accuracy can be achieved by combining it with the model parameter optimization algorithm. Calculations of long-distance infrared imaging results of the exhaust system and exhaust jets of aircrafts fueled by hydrocarbons show that, with and without considering the influence of aerosols, the maximum relative errors of the optimized MSMGWB model for the 3 to 5um band infrared signals effectively received by the infrared detector from aeroengine exhaust systems at 20/100 km is less than 9%, and the computational load is only one-fourth (1/4) of that of the commonly used statistical narrow-band model.

Key words: gas radiation; infrared detector; wide-band model; k-distribution model; virtual aerosol; infrared signals

0　引言

逐线计算(Line-By-Line, LBL)是最精确的气体辐射传输计算方法,对各类强非均匀气体混合物,固壁多次反射辐射,探测器光谱效应都具有良好的兼容性[1]。但LBL对算力的极高需求使其仍然难以成为工程辐射传输计算的实际方法。各类气体辐射谱带模型计算均匀[2-4]和弱非均匀[5-6]介质中的辐射传输问题达到了工程可用的精度和效率,但在强非均匀介质中仍然无法达到理想的精度。例如飞行器高温喷流辐射在大气中远距离传输衰减特性计算,是当前红外遥感探测领域的1个重要关注点。

Modest等[7]和Riviere等[8]的研究指出,上述问题的主要原因在于燃气喷流的温度与主要辐射参与性组分(二氧化碳和水蒸气)的摩尔比例与大气存在较大差异,导致上述气体辐射谱带模型的关联k(Cor-

收稿日期:2023-05-30　**基金项目**:国家级研究项目资助
作者简介:李一涵(1995),男,在读博士研究生。

引用格式:*李一涵,胡海洋,王强,等.兼容探测器效应的燃气红外特性计算宽带模型[J].航空发动机,2025,51(6):52-58.LI Yihan,HU Haiyang,WANG Qiang,et al.Wide-band model for infrared signature calculation of combustion gas compatible with detector effects[J].Aeroengine,2025,51(6):52-58.*

related k，CK）假设被破坏；Modest 等[9]指出气体辐射吸收谱线中“热线”（Hot line）的存在导致温度非均匀性对其吸收光谱CK特性的破坏；针对该问题，现有的解决方案可分为由 Yu 等[10]、Pierrot 等[11]以及 Soufiani 等[12]提出的多线组方法（Multiple Line Group，MLG）和 West 等[13]与 Andre 等[14-15]提出的谱映射方法（Spectral mapping method，SMM）。组分摩尔比非均匀性引起的CK特性破坏则是由各辐射参与性组分的吸收光谱差异所致，现有解决方案包括Pierrot等[16]采用的基于联合分布函数的方法；Shi 等[17]采用的多重积分方法；Zhang等[18]采用的各类卷积方法。同时应当看到，上述每种处理CK特性破坏机制的方法都将伴随着模型计算量的增大。相比之下，Hu 等[19-21]建立的多尺度多线组宽带 k 分布（Multi-Scale Multi-Group WideBand k-Distribution，MSMGWB）模型在预测热燃气喷流远距离红外辐射信号时能够兼顾计算效率与精度，其原理在于采用统一的方法处理上述2种CK特性破坏机制。但其也具有宽带 k 分布模型的共同缺点——无法在目标远距离红外特性计算的最终环节处理红外探测器光电响应特性随入射波长的变化，原因在于 k 分布变换破坏了辐射光谱信息。

现有各类窄谱带模型虽然完美兼容上述探测器效应，但计算燃气发射辐射的大气传输过程面临计算量大计算精度低等一系列问题。本文采用虚拟气溶胶法兼容MSMGWB模型与探测器效应，并通过模型参数的优化对典型红外探测器最终接收到的超声速排气系统及其尾喷流3~5 μm波段红外信号进行快速计算。

1　MSMGWB模型的建立

不考虑散射增益项的辐射传输方程（radiative transfer equation，RTE）为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_\eta}{\mathrm{d}s}=\left(k_\eta(\underline{\phi})-k_{s\eta}(\underline{\phi})\right)I_{b\eta}-k_\eta(\underline{\phi})I_\eta\\ I_{\Delta\eta}=\displaystyle\int_{\eta_L}^{\eta_U}I_\eta\mathrm{d}\eta\end{cases}\tag{1}$$

式中：k_η 和 $k_{s\eta}$ 分别为 η 波数处的光谱吸收系数和光谱散射系数，$k_\eta=k_{s\eta}+\sum_{n=1}^{4}k_{n\eta}$，$k_{s\eta}=k_{4s\eta}$，$k_{n\eta}$ 为第 n 种组分的光谱吸收系数，下标 $n=1$ 和 $n=2$ 分别代表碳氢化合物燃料燃烧排气的主要辐射参与性组分水蒸气和二氧化碳，下标 $n=3$ 和 $n=4$ 分别表示一氧化碳和环境空气中的气溶胶颗粒；$\underline{\phi}=(x,P,T,N)$，为混合介质的热力学状态参数（组分摩尔分数、压力、温度和气溶胶粒子数密度），k_η 和 $k_{s\eta}$ 随 $\underline{\phi}$ 改变而改变；I_η 和 $I_{b\eta}$ 分别为光谱辐射亮度和黑体光谱辐射亮度，并且有 $\int_0^\infty I_{b\eta}(T)\mathrm{d}\eta=\sigma T^4/\pi$；$s$ 为辐射传递沿程路径的位置。

本文中的 $k_{4\eta}$ 和 $k_{4s\eta}$ 由 Mie 散射理论[22-23]计算得到，$k_{n\eta}\big|_{\ n=1\sim3}$ 基于2010版高温分子光谱数据库（High-temperature Molecular Spectroscopic Database，HITEMP）结合逐线计算获得[24]。波数积分范围 η_L 和 η_U 在本文中的取值分别为 2000 $\mathrm{cm^{-1}}$ 和 3333 $\mathrm{cm^{-1}}$，对应于3~5 μm波段的大气红外窗口）。除非另有说明，本文后续公式中的所有参数均基于当地 $\underline{\phi}$ 计算。

MSMGWB模型的建立分为3步。

（1）由于喷气发动机高温燃气中一氧化碳和气溶胶的浓度极低以及RTE的线性叠加性质，对于飞行器喷流内部的辐射传输及其进入大气后的传输衰减过程，式（1）可以改写为[25-27]

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_{n\eta}}{\mathrm{d}s}=k_{n\eta}I_{\mathrm{b}\eta}(T)-k_\eta I_{n\eta}\\ I_\eta=\displaystyle\sum_{n=1}^{2}I_{n\eta}\\ k_{3\eta}=k_{4\eta}=k_{4s\eta}=0\\ I_{\mathrm{b}\eta}=0\end{cases}\tag{2}$$

由于燃气组分和大气组分的区别，$I_{n\eta}$ 的发射项视作仅来自水蒸气和二氧化碳，对于燃气内部的辐射传输，RTE吸收项也仅考虑这2种介质的贡献。对于上述辐射进入大气后的传输，RTE中的吸收项则考虑所有4种组分的贡献及气溶胶的散射衰减贡献。大气本身发射和散射的辐射通常被视为背景辐射单独计算，在本研究中不考虑。

（2）建立混合介质消光系数 k 与第 n 组分累积分布函数 $g_n(k_n,T_0)$ 之间的关系[21, 27]

$$\begin{cases}\displaystyle\int_0^{g_n\left(k_n(g_n,T_0),T\right)}k_n'(g_n',T)\mathrm{d}g_n'=\frac{1}{I_{b,\Delta\eta}(T)}\int_{\eta_L}^{\eta_U}k_{n\eta}H(k-k_\eta)I_{b\eta}(T)\mathrm{d}\eta\\ g_n(k_n,T)=\dfrac{1}{I_{b,\Delta\eta}(T)}\displaystyle\int_{\eta_L}^{\eta_U}H(k_n-k_{n\eta})I_{b\eta}(T)\mathrm{d}\eta\end{cases}\tag{3}$$

式中：$I_{b\Delta\eta}(T)=\int_{\eta_L}^{\eta_U}I_{b\eta}(T)\mathrm{d}\eta$；$k_n$ 为第 n 种组分的吸收系数；H 为Heaviside阶跃函数；T_0 为参考温度。

式（3）表明 $g_n(T_0)$ 是 k_n 和 k 的单调递增函数。因

此，基于均匀介质的k分布理论，式(2)可以变换为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_{ng}}{\mathrm{d}s}=k_n^*(g_n,T_0)\mathbf{a}_n(k_n^*,T,T_0)I_{b,\Delta\eta}(T)-k(g_n,T_0)I_{ng}\\ I_{\Delta\eta}=\sum_{n=1}^{2}I_n=\sum_{n=1}^{2}\int_0^1 I_{ng}\mathrm{d}g_n(T_0)\end{cases}\tag{4}$$

式中：k_n^*为第n种组分的虚拟吸收系数；$\boldsymbol{a}_n\left(k_n^*,T,T_0\right)=\mathrm{d}g_n\left(k_n^*,T\right)/\mathrm{d}g_n\left(k_n^*,T_0\right)$，为拉伸因子。

在非均匀且仅有一种辐射参与性组分的介质中，如果其消光光谱具有关联特性，即$g_n\left(\underline{\phi},k_{n\eta},T_0\right)=F\left(k_{n\eta}\left(\underline{\phi}_{ref}\right)\right)\big|_{\substack{n\equiv 1\\ \forall\eta,\underline{\phi}}}$，则式(4)和式(1)等价。这里$F$，为单调递增的函数，$\underline{\phi}_{ref}$为热力学参考状态。同样，对于包含2个或更多种参与组分的非均质介质，只有当

$$g_n(\underline{\phi},k_\eta,T_0)=F\left(k_\eta(\underline{\phi}_{ref})\right)\big|_{\ \forall\eta,\underline{\phi}}\tag{5}$$

成立时，式(1)和式(4)等价[19-21]。然而在实际工况中，每种热力学状态$\underline{\phi}$下的k_η并不一定能对应到同一个$g_n\left(\underline{\phi},k_\eta,T_0\right)$值，这是式(1)、(4)的计算结果差异的来源，特别是在$\underline{\phi}$变化较大的情况下。

(3)最重要的1步是将第n个组分的吸收光谱划分为M_n个互斥的子集，以此在每个子集中保证对关心的各热力学状态式(5)都尽可能成立[21]。此时，式(2)~(4)可以改写为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_{nm\eta}}{\mathrm{d}s}=k_{nm\eta}I_{b\eta}(T)-k_\eta I_{nm\eta}\\ I_\eta=\sum_{n=1}^{2}\sum_{m=1}^{M_n}I_{nm\eta}\\ k_{3\eta}=k_{4\eta}=k_{4s\eta}=0\\ I_{b\eta}=0\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}\int_0^{g_{nm}\left(k'_{nm},T_0,T\right)}k'_{nm}\left(g'_{nm},T\right)\mathrm{d}g'_{nm}=\dfrac{1}{I_{b,\Delta\eta}(T)}\int_{\eta_L}^{\eta_U}k_{nm\eta}H(k-k_\eta)I_{b\eta}(T)\mathrm{d}\eta\\ g_{nm}\left(k_{nm},T\right)=\dfrac{1}{I_{b,\Delta\eta}(T)}\int_{\eta_L}^{\eta_U}H(k_{nm}-k_{nm\eta})I_{b\eta}(T)d\eta\end{cases}\Bigg|_{\substack{\eta\in m-\text{th group}\\ \text{of}\ n-\text{th species}}}\tag{7}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_{nmg}}{\mathrm{d}s}=k_{nm}^*(g_{nm},T_0)\mathbf{a}_{nm}(k_{nm}^*,T,T_0)I_{b,\Delta\eta}(T)-k(g_{nm},T_0)I_{nmg}\\ I_{\Delta\eta}=\sum_{n=1}^{2}\sum_{m=1}^{M_n}I_{nm}=\sum_{n=1}^{2}\sum_{m=1}^{M_n}\int_0^1 I_{nmg}\mathrm{d}g_{nm}(T_0)\\ \mathbf{a}_{nm}(k_{nm}^*,T,T_0)=\dfrac{\mathrm{d}g_{nm}(k_{nm}^*,T)}{\mathrm{d}g_{nm}(k_{nm}^*,T_0)}\end{cases}\tag{8}$$

$k_{1\eta}$、$k_{2\eta}$彼此的分组各自独立，因此M_1和M_2也可以选取不同值。分割吸收光谱的波数间隔的宽度必须等于或小于LBL基准计算中使用的宽度，本研究中设为0.005cm^{-1}。分组策略由以下步骤实现[30]：

步骤1 选取在计算碳氢燃料燃气发射辐射及其大气传输衰减过程中出现的典型气体热力学状态$\underline{\phi}_i$和$\underline{\phi}_{i'}$。

步骤2 随机初始化水蒸气吸收光谱每个波数间隔所属的分组。

步骤3 为每一波数间隔计算其划分到第m组的关联k特性值

$$\xi_{nm\eta}=\sum_{i=1}^{5}\sum_{i=6}^{9}\ln^2\left(\frac{k_\eta(\underline{\phi}_{i'})}{k(\underline{\phi}_{i'},g_{nm}(\underline{\phi}_i,k_\eta,T_0),T_0)}\right)\Bigg|_{n=1}\tag{9}$$

计算每一波数间隔划分到M_1个组所各自对应的$\xi_{nm\eta}$值，并将该波数间隔重新分配到对应$\xi_{nm\eta}$最小值的组(意味着同组的有些波数子区间不会改变分组继续留在当前组，有些则分配至其它组)。

步骤4 重复步骤3，直到本次迭代过程中被重新分配至其它组的波数间隔(或对应的$k_{1\eta}$)低于总数的0.1%。

步骤5 对所有$k_{2\eta}$也进行步骤2~4的分组优化。

上述分组的策略在于最小化$\xi_{nm\eta}$，对于任意属于第m组第n种组分的η，当$\xi_{nm\eta}=0$时，有$g_{nm}\left(\underline{\phi},k_\eta,T_0\right)=F\left(k_\eta\left(\underline{\phi}_{ref}\right)\right)\big|\ \forall\underline{\phi}$成立，即不同$\underline{\phi}$下该分组的辐射光谱是关联的。

当中间式采用Gauss-Legendre积分计算时，式(8)改写为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_{nm\bar{g}_{\bar{q}}}}{\mathrm{d}s}=\bar{\mathbf{A}}_{nm,\bar{q}}(T)I_{b,\Delta\eta}(T)-k(\bar{g}_{nm,\bar{q}},T_0)I_{nm\bar{g}_{\bar{q}}}\\ I_{\Delta\eta}=\sum_{n=1}^{2}\sum_{m=1}^{M_n}I_{nm}=\sum_{n=1}^{2}\sum_{m=1}^{M_n}\sum_{\bar{q}=1}^{N_{nmg}}I_{nm\bar{g}_{\bar{q}}}\\ I_{nm\bar{g}_{\bar{q}}}=\int_{\tilde{g}_{nm,\bar{q}-1}}^{\tilde{g}_{nm,\bar{q}}}I_{nmg}\mathrm{d}g_{nm}(T_0)\\ \bar{\mathbf{A}}_{nm,\bar{q}}(T)=\int_{\tilde{g}_{nm,\bar{q}-1}}^{\tilde{g}_{nm,\bar{q}}}k_{nm}^*\mathbf{a}_{nm}\left(k_{nm}^*(g_{nm},T_0),T,T_0\right)\mathrm{d}g_{nm}(T_0)=\\ \dfrac{1}{I_{b,\Delta\eta}(T)}\int_{\eta_L}^{\eta_U}k_{nm\eta}I_{b\eta}(T)H\left(k_{nm}(\tilde{g}_{nm,\bar{q}},T_0)-k_{nm\eta}\right)H\left(k_{nm\eta}-k_{nm}(\tilde{g}_{nm,\bar{q}-1},T_0)\right)d\eta\\ \phi=\tilde{g}_{nm,0}<\bar{g}_{nm,1}<\tilde{g}_{nm,1}<\bar{g}_{nm,2}<\cdots<\tilde{g}_{nm,\bar{q}-1}<\bar{g}_{nm,\bar{q}}<\tilde{g}_{nm,\bar{q}}<\cdots\\ <\tilde{g}_{nm,N_{nmg}-1}<\bar{g}_{nm,N_{nmg}}<\tilde{g}_{nm,N_{nmg}}=g_{nm}(\infty,T_0)\end{cases}\tag{10}$$

式中：N_{nmg}为$\bar{g}_{nm,\bar{q}}(T_0)$的总个数；$\dfrac{\bar{g}_{nm,\bar{q}}}{g_{nm}(\infty,T_0)}$和

$\frac{\tilde{g}_{nm,\bar{q}}}{g_{nm}(\infty,T_0)}$为仅取决于所选的 Gauss-Legendre 积分的常数[31]。

需要注意的是，与文献[21]中给出的 MSMGWB 模型相比，本研究中采用模型的唯一区别是，用于计算 I_{nm} 的每个 Gauss-Legendre 积分格式彼此独立。

当考虑灰体固壁的漫发射和反射辐射时，式(8)的边界条件[19-20]为

$$I_{nm\bar{g},\bar{q},w}=\frac{\varepsilon}{k(\underline{\phi}_w,\bar{g}_{nm,\bar{q}},T_w)}\bar{\mathbf{A}}_{nm,\bar{q}}(\underline{\phi}_w,T_w)I_{b,\Delta\eta}(T_w)+\frac{1-\varepsilon}{\pi}\int_0^{4\pi}I_{nm\bar{g},\bar{q}}(\vec{s})\max(-\vec{n}_w\cdot\vec{s},0)\mathrm{d}\Omega \tag{11}$$

式中：$\underline{\phi}_w=(x_w,P_w,T_w,N_w)$中的参数分别取自壁面的压力和温度，以及与壁面相邻的气体的组分摩尔分数和颗粒数密度；ε 为灰体壁面发射率；$\vec{s}$ 为入射辐射(单位)方向矢量；Ω 为 $\vec{s}$ 对应的立体角；$\vec{n}_w$ 为壁面法向单位向量。

吴越等[30]基于 2 类共计 56 个 1 维算例，对采用上述分组策略的 MSMGWB 模型的最优分组组合和匹配的高斯积分格式进行优化。这 2 类算例如图 1 所示，分别为固定厚度高温燃气层的法向发射辐射在环境空气中传输；黑体固壁与至固定厚度高温燃气层的叠加法向发射辐射在环境空气中传输，代表了 2 类最常见的飞行器排气系统辐射传输场景。

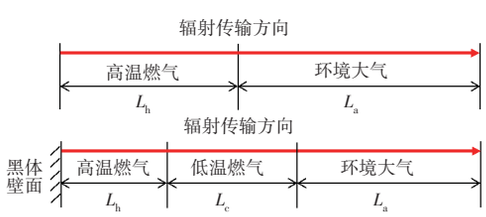


图 1　用于 MSMGWB 模型参数优化的 2 类 1 维算例辐射传输路径

2　考虑红外探测器光谱响应特性的影响

2.1　归一化红外探测器光谱吸收率

在计算红外探测器 3~5 μm 波段接收到的红外信号时，有必要考虑探测器光谱响应特性的影响。在实际传输过程中，入射红外辐射在透过探测器窗口后，在红外探测器的 CCD 单元上转化为电信号，如图 2 所示。因此，在评估红外探测器的光谱响应特性时，必须综合考虑窗口透射特性和 CCD 的光电转换特性：一方面，窗口材料(例如蓝宝石玻璃)的吸收率高度依赖于其温度和厚度，以及入射辐射的波长[32]，如图 3(a)所示；另一方面，CCD 的光电转换性能也随入射辐射的波长而显著变化，以归一化探测率 D^* 描述，其定义为每 2 次方根探测器面积每单位方均根入射辐射功率在 1Hz 带宽处的方均根信噪比(signal-to-noise ratio，SNR)[33]，单位为 cm · $Hz^{1/2}W^{-1}$。依据在 3~5μm 波段的工作性能，本研究选择了 2 种不同材料制成、不同工作温度的 CCD 如图 3(b)所示。

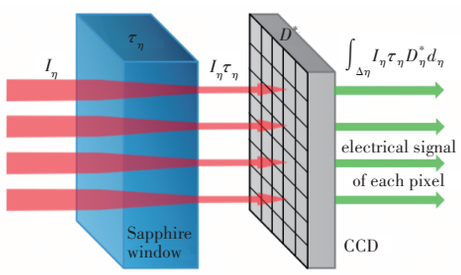
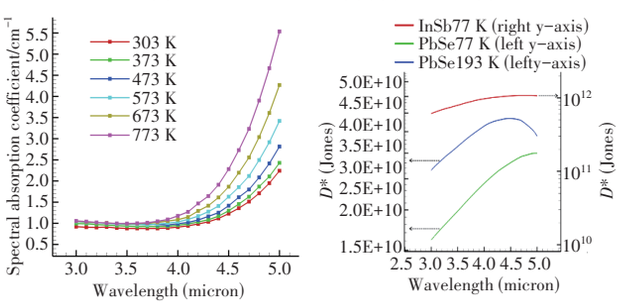


图 2　红外信号进入探测器的传输及光电转换过程



(a) 3 种典型 CCD　　(b)3 ~ 5 μm 波段光电转换性能

图 3　蓝宝石在不同温度下的光谱吸收系数

为了评估入射辐射波长对由 CCD 和窗口材料(例如蓝宝石)组成的红外探测器响应特性的影响，将红外探测器的等效光谱吸收率定义为

$$\alpha_\eta^{eq}=\frac{\tau_\eta\cdot D_\eta^*}{\max(\tau_\eta\cdot D_\eta^*)\big|_{\eta_L<\eta<\eta_U}} \tag{12}$$

式中：τ_η 和 D^* 分别为蓝宝石窗口的透射率和 CCD 在波数 η 下的探测率。

本文中使用的 4 种红外探测器的等效光谱吸收率分布如图 4 所示。分别具有不同的 CCD 类型、CCD 工作温度、防护窗口温度、防护窗口厚度，例如图中“InSb (PV) 77 K+4 mm sapphire 303 K”表示 InSb 材料的光伏探测器结构(PC 代表光电导探测器)，其工作温度为 77 K，

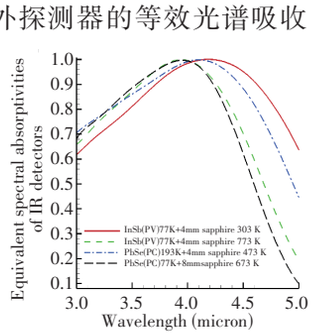


图 4　2 种红外探测器在不同工作温度下的 3 ~ 5 μm 波段等效光谱吸收率

被厚度为 4 mm 且自身温度为 303 K 的蓝宝石窗口覆盖。

2.2 考虑红外探测器光谱响应的 MSMGWB 模型

当考虑等效光谱吸收率 α_η^{eq} 的影响时，式(1)可以改写为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_\eta}{\mathrm{d}s}=\left(k_\eta(\underline{\phi})-k_{s\eta}(\underline{\phi})\right)I_{b\eta}-k_\eta(\underline{\phi})I_\eta\\ I_{\Delta\eta}^{D}=\displaystyle\int_{\eta_L}^{\eta_U}\alpha_\eta^{eq}I_\eta\mathrm{d}\eta\end{cases}\tag{13}$$

式中：$I_{\Delta\eta}^{D}$ 为红外探测器接收到的等效辐射。

当不考虑来自环境空气的发射和散射辐射时，式(13)可以进一步改写为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}I_\eta^{eq}}{\mathrm{d}s}=\left(k_\eta(\underline{\phi})-k_{s\eta}(\underline{\phi})\right)I_{b\eta}-\left(k_\eta(\underline{\phi})+k_{5\eta}\right)I_\eta^{eq}\\ I_{\Delta\eta}^{D}=\displaystyle\int_{\eta_L}^{\eta_U}I_\eta^{eq}\mathrm{d}\eta\\ k_{3\eta}=k_{4\eta}=k_{4s\eta}=k_{5\eta}=0\\ I_{b\eta}=0;\qquad k_{5\eta}=-\ln(\alpha_\eta^{eq})/L_a\end{cases}\tag{14}$$

式中：L_a 为目标和探测器之间的辐射传输路径长度。

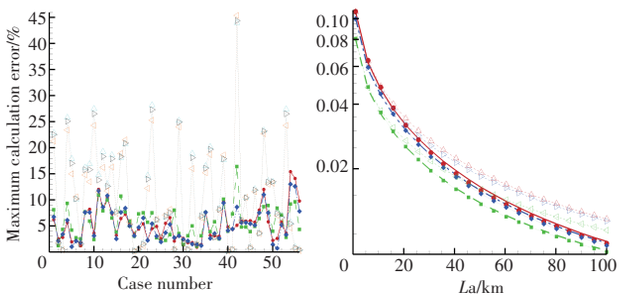
式(14)意味着 α_η^{eq} 对 $I_{\Delta\eta}^{D}$ 的影响相当于向环境空气中添加虚拟气溶胶(吸收系数以 $k_{5\eta}$ 表示)，且该虚拟气溶胶吸收系数 $k_{5\eta}$ 在 MSMGWB 模型中的处理方法与式(2)中的 $k_{4\eta}$ 相同。

本文对 MSMGWB 模型参数的优化同样以文献[30]中的 56 个 1 维算例的综合计算误差作为目标函数，但考虑了 3 种不同的红外探测器（InSb(PV)77 K+4 mm sapphire 303 K，InSb(PV)77 K +4 mm sapphire 773 K，PbSe (PC) 193 K+4 mm sapphire 473 K）在 3~5 μm 波段的光谱响应特性的影响，优化目标函数中的计算误差 $error_{j,max}$[30]因此重新定义为

$$r_{j,\max}=\max\left(\left|\frac{I_{\Delta\eta j,\mathrm{MSMGWB}}^{D,\bar{k}}(L_a)-I_{\Delta\eta j,\mathrm{LBL}}^{D,\bar{k}}(L_a)}{I_{\Delta\eta j,\mathrm{LBL}}^{D,\bar{k}}(L_a)}\right|\right)\Big|_{\bar{k}=1\sim3}\tag{15}$$

式中：$\bar{k}$ 为红外探测器的序号；j 为 56 个 1 维算例对应顺序的编号。

最终优化结果如图 5 所示。优化后的 MSMGWB 模型的 T_0、M_1、M_2 的值以及求解的 RTE 总数分别为 2500 K, 5, 12和78。多线组统计窄带（Statistical Narrow-Band based on Fictitious-Gas，SNBFG）模型的计算精度几乎与红外探测器的光谱响应特性无关，但总体计算精度明显低于 MSMGWB 模型的，其求解的 RTE 总数也高达 336 个(正比于模型计算量)。

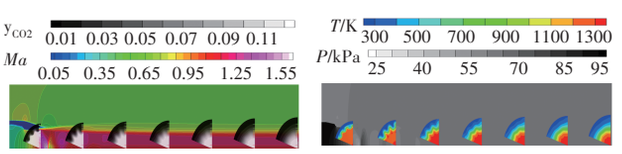


(a) 最大误差分布　　(b) 计算结果

图 5 SNBFG 和 MSMGWB 模型在 56 个 1 维算例中的最大误差分布和算例 10 的计算结果

2.3 超声速排气系统远距离红外辐射成像计算结果及分析

本文采用与文献[30]相同的 V 形尾缘超声速排气系统算例(如图 6(a)所示)，验证考虑红外探测器光谱响应特性影响的 MSMGWB 模型对复杂碳氢燃料高温流体机械及其尾喷流远距离红外成像的计算精度。排气系统工作高度为 7 km，红外探测器位于地面，计算采用的 0~7 km 环境空气热力学状态参数与气溶胶



(a) 超声速排气系统几何结构　　(b) 内外流场计算结果

图 6 超声速排气系统几何结构与内外流场计算结果

光谱消光特性详见文献[30]。该排气系统内外流场及固体结构温度场的计算结果如图 6(b)、7 所示。红外探测器 CCD 为 PbSe (PC)，工作温度 77 K，其防护玻璃为蓝宝石，厚度 8 mm，温度 673 K，其等效光谱吸收率如图 4 所示。

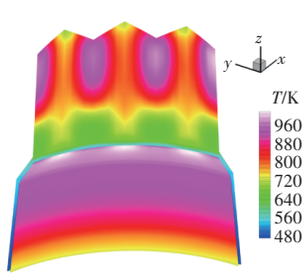
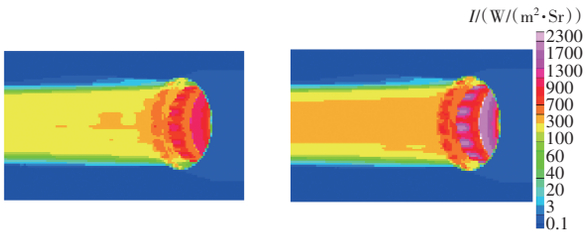


图 7 超声速排气系统固体结构温度场计算结果

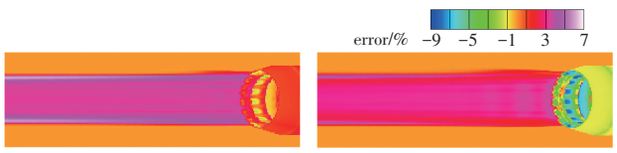
考虑探测器与排气系统距离 20 km、环境空气中有气溶胶和探测器与排气系统距离 100 km、环境空气中无气溶胶 2 种工况，该探测器接收的排气系统 3~5 μm 波段等效红外成像 LBL 模型计算结果如图 8 所示。考虑到 LBL 模型的计算量，本文忽略排气系统固壁反射辐射的影响。定义 MSMGWB 模型的计算误

差为$(I_{MSMGWB}-I_{LBL})/I_{LBL}\times 100\%$。后者在上述考虑和不考虑气溶胶影响的工况下的最大相对计算误差分别为-2.3%+6.9%和-8.9%+5.0%,如图9所示。



(a) 20 km含气溶胶环境　　(b) 100 km无气溶胶环境

图8　考虑探测器光谱响应特性影响的排气系统3~5 μm波段等效红外成像LBL计算结果



(a) 20 km含气溶胶环境　　(b) 100 km无气溶胶环境

图9　考虑探测器光谱响应特性影响的排气系统3~5 μm波段等效红外成像MSMGWB模型计算误差分布

3　结论

(1)本文扩展了多线组宽带k分布模型MSMGWB的使用场景,并优化了模型参数。

(2)引入等效光谱吸收率实现了多线组宽带k分布模型MSMGWB与红外探测器光谱响应特性的兼容;

(3)以56个高温燃气/固壁发射辐射的大气传输衰减特性1维算例的综合误差作为评价函数,优化了MSMGWB模型参数。

(4)优化后的模型在上述1维算例与复杂结构超声速排气系统及其碳氢燃料燃气尾喷流远距离红外成像3维数值计算中的计算误差远低于常用的统计窄带模型,但计算量不足后者的1/4 。

参考文献:

[1] Hartmann J M, Leon R L D, Taine J. Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for H2O[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1984, 32(2):119-127.

[2] 饶乐威,王天壹,连文磊.热辐射对气膜冷却叶片表面热负荷的影响[J].航空发动机,2023,49(4):38-47.
RAO Lewei, WANG Tianyi, LIAN Wenlei. Effect of thermal radiation on the thermal load of a film-cooled vane[J]. Aeroengine, 2023, 49(4): 38-47.

[3] Andre F. The l-distribution method for modeling non-gray absorption in uniform and non-uniform gaseous media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016, 179: 19-32.

[4] Modest M F. Narrow-band and full-spectrum k-distributions for radiative heat transfer-correlated-k vs. scaling approximation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 76(1):69-83.

[5] Marin O, Buckius R O. Wide band correlated-k approach to thermal radiative transport in nonhomogeneous media[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119: 719-729.

[6] Modest M F. Radiative heat transfer[M]. San Diego: Academic Press, 2013:344-356.

[7] Modest M F, Zhang H. The full-spectrum correlated-k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures[J]. Journal of Heat Transfer ,2002, 124(1):30.

[8] Riviere P, Soufiani A, Taine J. Correlated-k fictitious gas model for H2O infrared radiation in the Voigt regime[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,1995, 53(3):335-346.

[9] Modest M F, Zhang H. Scalable multi-group full-spectrum correlated-k distributions for radiative transfer calculations[J]. Journal of Heat Transfer, 2003,125(3):454-461.

[10] Yu V, Khodyko A A, Kurskov N V. Multigroup method for the calculation of selective IR radiation transfer in nonhomogeneous media[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 1986, 44(3): 284-288.

[11] Pierrot L, Riviere P, Soufiani A, et al. A fictitious-gas-based absorption distribution function global model for radiative transfer in hot gases[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1999, 62(5): 609-624.

[12] Soufiani A, Andre F, Taine J. A fictitious-gas based statistical narrow-band model for IR long-range sensing of H2O at high temperature[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer , 2002, 73:339-347.

[13] West R, Crisp D, Chen L. Mapping transformations for broadband atmospheric radiation calculations[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer ,1990, 43(3): 191-199.

[14] Andre F, Hou L, Roger M, et al. The multispectral gas radiation modeling: a new theoretical framework based on a multidimensional approach to k-distribution methods[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer ,2014, 147(147):178-195.

[15] Andre F, Solovjov V P, Webb B W, el at. Spectral mapping method based on intervals of comonotonicity for modelling of radiative transfer in non-uniform gaseous media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2019, 229:33-39.

[16] Pierrot L, Soufiani A, Taine J. Accuracy of narrow-band and global models for radiation transfer in H2O, CO2, and H2O-CO2 mixtures at high temperature[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,1999, 62(5):523-548.

[17] Shi G, Xu N, Wang B, et al. An improved treatment of overlapping absorption bands based on the correlated k, distribution model for thermal infrared radiative transfer calculations[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer,2009, 110(8):435-451.

[18] Zhang H, Nakajima T, Shi G, et al. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D20): 10-1.

[19] Hu H, Wang Q. Improved spectral absorption coefficient grouping strategy of wide band k-distribution model used for calculation of infrared remote sensing signal of hot exhaust systems[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2018, 213: 17-34.

[20] Wang Q, Li Y, Hu H. Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k-distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals[J]. Infrared Physical Technology, 2019, 96: 276-290.

[21] Hu H, Li Y, Wei Z, WANG Q. Parameter optimization for MSMGWB model used to calculate infrared remote sensing signals emitted by hot combustion gases of hydrocarbon fuel[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2020(1):249.

[22] Volz F E. IR index of atmospheric aerosol substances[J]. Applied Optics, 1972, 11: 755-759.

[23] Wiscombe W J. Improved mie scattering algorithms[J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 1505-1509.

[24] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2010, 111(15):2139-2150.

[25] Pal G, Modest M F. A new hybrid full-spectrum correlated k-distribution method for radiative transfer calculations in nonhomogeneous gas mixtures[C]//ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2007 InterPACK Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007:429-438.

[26] Pal G, Modest M F. A narrow band-based multiscale multigroup full-spectrum k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous gas-soot mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 291-303.

[27] Zhang H, Modest M F. A multi-scale full-spectrum correlated- k, distribution for radiative heat transfer in inhomogeneous gas mixtures [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 73(2):349-360.

[28] Cai J, Modest M F. Improved full-spectrum k-distribution implementation for inhomogeneous media using a narrow-band database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2014, 141(7):65-72.

[29] Hu H, Wang Q. Improved spectral absorption-coefficient grouping strategies in radiation heat transfer calculations for combustion gases with pressure and temperature inhomogeneity[J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 2019, 75(3): 178-197.

[30] 吴越, 胡海洋, 王强, 等. 多尺度多线组宽带k分布模型参数优化方法[J]. 航空动力学报, 2022(7): 1-14.
WU Yue, HU Haiyang, WANG Qiang, et al. Parameter optimization of multi-scale multi-group wide-band k-distribution models[J]. Journal of Aerospace Power, 2022(7): 1-14.(in Chinese)

[31] Solovjov V P, Andre F, Lemonnier D, et al. The rank correlated SLW model of gas radiation in non-uniform media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 197(8): 26-44.

[32] Lee G W, Jeon S, Park S N, et al. Temperature and thickness dependence of IR optical properties of sapphire at moderate temperature[J]. International Journal of Thermophysics, 2011, 32 (7-8), 1448-1456.

[33] Antoni R. Infrared detectors[M]. Los Angles: CRC Press, 2010: 12-13.

（编辑：程 海）