

## BMC 法计算航空发动机红外辐射的效率研究

黄 伟, 吉洪湖

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 反向蒙特卡罗(BMC)法的计算精度高、适应性强,是计算目标红外辐射特征的常用方法。基于 CFD 和 IR 综合计算分析的方法,研究了射线步长、射线数、射线携带能量方式等因素对 BMC 法计算航空发动机红外辐射强度的效率的影响。结果表明:射线步长与喷管出口当量直径比在 0.05~0.1 的范围内,射线数达到  $10^5$  量级时的计算效率较高;采用射线携带多个波段能量的方法,计算时间可缩短数十倍;通过 MPI 平台实现了并行计算,进一步缩短 BMC 法的计算时间,但并行效率随着计算核心的增加而下降。在保证计算精度的前提下,通过合理地选择参数、算法改进和并行计算,提高了计算效率。

**关键词:** 反向蒙特卡罗; 航空发动机; 红外辐射; 效率

**中图分类号:** TK121; TN211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2334-05

## Efficiency of aero-engine infrared radiation computation by using BMC method

Huang Wei, Ji Honghu

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The Backward Monte Carlo (BMC) method is a common method for calculating the target's infrared radiation signature because of its high accuracy and strong adaptability. Based on general CFD/IR numerical calculation method, the impact of ray discrete step size, ray number, energy carrying method on aero-engine infrared radiation intensity computation efficiency was investigated by using BMC method. The results show that the computation efficiency is high when the ratio of ray discrete step size to equivalent diameter of nozzle exit is between 0.05 to 0.1 and ray's number is more than  $10^5$ ; the computation time can be shortened by dozens of times through ray carrying multiple bands energy method; the computation time of BMC method can be reduced further by parallel computation with MPI platform, but the parallel efficiency will be decreased with increasing the computation core number. In the premise of ensuring the accuracy of the results, the efficiency of infrared radiation computation was improved by reasonable selection of parameters, algorithm improvement and parallel computation.

**Key words:** BMC; aero-engine; infrared radiation; efficiency

## 0 引言

航空发动机的高温热部件以及热喷流中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  气体介质在红外波段会产生强烈的红外辐射,即使经过长距离的大气衰减,仍会有明显高于环境的辐射特征,从而成为红外探测器的理想探测目标。航空发动机的结构复杂,通常采用 CFD/IR 法计算其红外辐射,即先通过 CFD 计算获得壁面边界的温度分布和喷流体单元的温度、组分浓度和压力分布,然后采用辐射传输计算方法获得任意方向的红外辐射强度。在保证计算精度的前提下,如何能提升计算效率,缩短研究周期,是航空发动机红外辐射研究中的一个重要问题。

在众多的数值计算辐射传输的方法中,反向蒙特卡洛(BMC)法<sup>[1-2]</sup>的计算精度高,通常作为其他方法的对比基准<sup>[3-4]</sup>。同时,该方法适应性强,可以处理参与性介质、散射以及非漫灰边界等复杂问题,从而在红外辐射特征的计算中获得了广泛应用<sup>[5-10]</sup>。但是采用这种方法同时计算不同谱带、不同方向辐射强度的复杂工程问题<sup>[3]</sup>时,需要进行大量的随机判断,从而带来计算效率低的问题。

文中以航空发动机排气系统为研究对象,通过对影响红外辐射特征计算结果的主要因素进行分析,并采用算法优化和并行计算的方法实现快速计算,在保证足够计算精度的前提下,提高了 BMC 法计算航空发动机红外辐射特征的效率。

## 1 计算方法

### 1.1 喷流温度、压力和组份浓度计算

计算喷流温度、压力和组份浓度的主流方法是求解雷诺平均的 Navies-Stocks(简称 RANS)方程和标量守恒方程<sup>[11]</sup>。这些方程的求解需要湍流模型进行封闭,如两方程模型。湍流模型建立了 RANS 方程中的雷诺应力、湍流标量通量与速度梯度以及温度、浓度梯度之间的关系。

RANS 方程和标量守恒方程的求解采用 FLUENT 软件。计算中,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  等有吸收-发射作用的燃气的浓度场采用组分传输模型模拟,湍流模型选用 SST  $k-\omega$  两方程模型,燃气与固体壁面之间的对流-辐射耦合传热采用 DO 模型。流动方程、湍动

能和耗散率方程均采用二阶迎风格式进行离散。

### 1.2 红外辐射特征计算的 BMC 法

发动机排气系统及红外辐射特征计算示意图如图 1 所示。发动机排气系统由涡轮、中心锥和喷管等部件组成,喷管出口直径为  $D_{\text{out}}$ ,核心区热喷流的温度约为 800 K。高温热部件和热喷流可看做由无数的辐射微元组成,这些辐射点源向空间辐射能量,只有在以探测器为顶点对目标所张的立体角  $\Omega_{\text{FOV}}$  中传输的射线才能到达探测器。

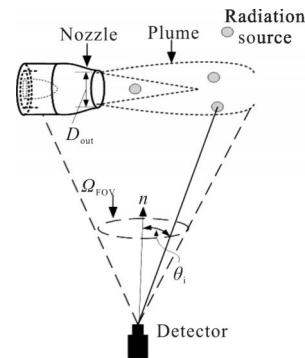


图 1 发动机排气系统及红外辐射特征计算示意图

Fig.1 Diagram of computation of infrared engine exhaust system and radiation

假设探测器距离喷流的距离为  $R$ ,视场方向矢量为  $\vec{n}$ ,任意辐射源与探测器视场方向的夹角为  $\theta_i$ ,那么照射到探测器表面上的辐射照度  $H$ <sup>[12]</sup>(单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ )为:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sum_{i=1}^N E_b(\lambda, T_i) \cos \theta_i}{\pi N} d\lambda \int_{\Omega_{\text{FOV}}} d\Omega \quad (1)$$

式中:  $E_b(\lambda, T_i)$  为黑体光谱辐射力,  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ ;  $T_i$  为第  $i$  条反向跟踪射线归宿点处的温度;  $N$  为从探测器视场中发出的射线数。

由于视场内的射线是均匀发射的,每条射线所代表的立体角可以认为相同,采用窄带模型将波段划分为  $M$  个等份后,辐射强度  $I_n$ (单位为  $\text{W}/\text{sr}$ )可表示为:

$$I_n = H \cdot R^2 = \frac{\Omega_{\text{FOV}} R^2}{\pi N} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N E_b(\lambda_j, T_i) \cos \theta_i \quad (2)$$

射线的归属有三种<sup>[12]</sup>: (1) 被介质吸收, (2) 被壁面吸收, (3) 离开计算域。判断任意条射线是否被介质吸收的过程是: 首先,当射线与喷流计算域有交点

时,向前推进  $ds$  距离,然后计算该段距离上的介质吸收率,

$$\alpha(\lambda, T, ds) = 1 - \exp(-\kappa(\lambda, T) \cdot ds) \quad (3)$$

式中:  $\kappa(\lambda, T)$  为介质的光谱吸收系数,  $\text{cm}^{-1}$ , 根据当地的压力、温度和组分浓度对 Hitemp 数据库进行插值计算得到。

然后,产生一个  $[0, 1]$  分布的随机数  $RAN_\alpha$ , 如果  $RAN_\alpha \leq \alpha(\lambda, T, ds)$ , 则认为射线被介质吸收, 否则认为穿过该段介质。

判断是否被壁面吸收的过程可参考参考文献[2]。如在射线到达边界时既不被介质吸收也不被壁面吸收, 则认为该条射线离开计算域。

### 1.3 影响 BMC 计算结果的因素

由前文的计算过程可以看出, 影响 BMC 计算结果的主要因素包括射线推进步长  $ds$ 、随机数、射线数  $N$  和射线携带能量的方式。

用数学方法产生伪随机数的方法有多种, 其中马特赛特旋转演算(Mersenne Twister, MT)法被认为是目前最好的伪随机数生成器之一, 因此文中选择 MT 法来生成随机数。由于该随机数生成方法均匀性好, 文中忽略了它对计算结果的影响。

射线携带能量的方式是指每条射线只携带一个波段的辐射能量或携带全部波段的能量。当每条射线只携带一个波段的辐射能量时, 计算表达式见公式(2), 即对每个子波段都从探测器发射  $N$  条射线, 判断每条射线的归属。当每条射线携带全部波段的辐射能量时, 计算式如下,

$$I_{in} = \frac{\Omega_{fov} R^2}{\pi N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E_b(\lambda_j, T_i) \cos \theta_i \quad (4)$$

公式(4)与公式(2)的主要区别在于追踪射线归属的过程, 公式(4)可同时判断一条射线在  $M$  个子波段上被吸收的情况, 采用了更少的射线, 因而具有更高的计算效率。

### 1.4 并行计算

由于在反向蒙特卡罗法的计算过程中, 各射线是相对独立的, 特别适合并行计算, 文中将采用 MPI 并行计算的方法来提高 BMC 法的计算效率。计算的硬件平台基于 intel CPU, 总的计算核心数为 8 个。

假设  $T_s$  表示使用单核计算所需的时间,  $T_N$  为并行使用  $N$  个核计算所需的时间, 则并行加速比为  $S_N =$

$T_s/T_N$ , 并行效率为  $E_N = S_N/N$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 射线步长的影响

图 2 给出了射线步长对辐射强度及计算时间的影响。由图可见,  $ds/D_{out}$  越小, 计算时间越长, 当  $ds/D_{out}$  从 1 降至 0.1 时, 计算时间增加了 2 倍, 当  $ds/D_{out}$  从 0.1 降至 0.01 时, 计算时间增加了 6 倍。还可以看出,  $ds/D_{out}$  减小, 计算值逐渐趋于稳定, 当  $ds/D_{out} < 0.05$  以后, 辐射强度计算值基本不变。从计算效率的角度考虑,  $ds/D_{out}$  较合适的取值范围是 0.1~0.05。

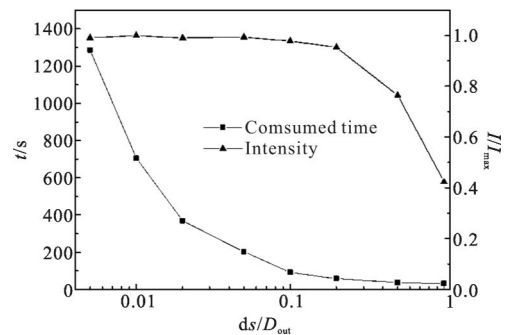


图 2 射线步长对辐射强度及计算时间的影响

Fig.2 Effect of ray discrete step on radiation intensity and computation time

### 2.2 射线数的影响

图 3 为射线数对辐射强度及计算时间的影响, 计算条件是  $ds/D_{out} = 0.05$ 。由图可见, 射线数越多, 计算耗时越长, 辐射强度值变化也越小, 当  $N$  大于  $4 \times 10^5$  以后, 辐射强度计算值稳定, 再增加射线数, 对计算结果的影响很小。

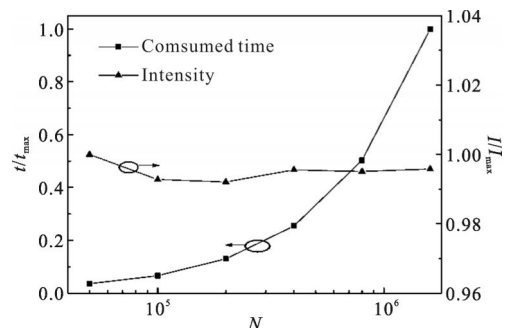


图 3 射线数对辐射强度及计算时间的影响

Fig.3 Effect of ray number on radiation intensity and computation time

图 4 为射线数光谱辐射强度分布的影响。由图可见, 当射线数较少时, 光谱辐射强度在除了  $\text{CO}_2$  吸

收波段以外的其他波段上都有明显的波动, 增加射线密度后, 光谱辐射强度整体都变得平滑。

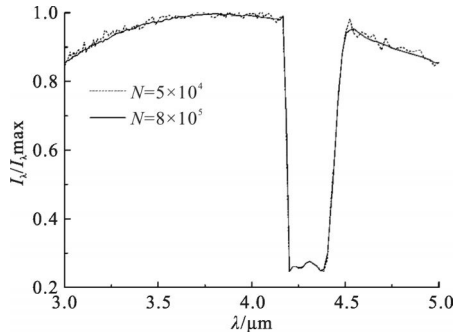


图 4 射线数对光谱辐射强度分布的影响

Fig.4 Effect of ray number on spectral radiation intensity

### 2.3 射线携带能量方式的影响

图 5 为射线携带能量方式对计算时间的影响, 图中的 133 个波段指将 3~5 μm 波段进行 133 等份。由图可见, 射线携带单个波段能量方法计算得到的积分辐射强度略大于射线携带多个波段能量方法的结果, 两者的差异约为 3%; 前者的计算耗时是后者的 24~28 倍, 远大于后者。可见, 采用单射线携带多波段能量的方法可大大缩短计算时间。

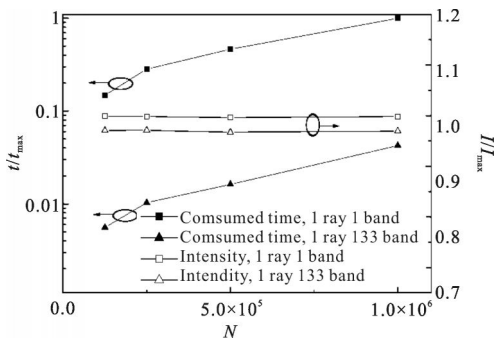


图 5 射线携带能量方式对计算时间的影响

Fig.5 Effect of ray energy carrying method on computation time

当计算的波段变窄时, 如只计算 CO<sub>2</sub> 有强烈吸收-发射作用的 4~4.5 μm 波段(28 等份), 第二种比第一种方法缩短的时间倍数有所降低, 大约可缩短 12~16 倍。

### 2.4 并行计算效率对比

图 6 为并行计算加速比和并行效率。由图可见, 对 BMC 法进行并行化后, 计算速度随着计算核心的增加而增加, 但并行效率随着计算核心数的增加而逐渐下降。采用两个计算核心时, 并行效率可达 95.5%, 采用 8 个计算核心时, 并行效率只有 62.6%。

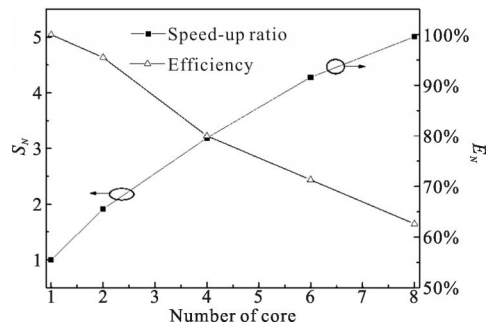


图 6 并行计算加速比和效率

Fig.6 Speed-up ratio and efficiency of parallel computation

## 3 结 论

综上所述, 可得出以下结论:

(1) 射线步长与喷管出口当量直径比越小, 计算精度越高, 计算耗时越长, 当比值在 0.05~0.1 的范围内时, BMC 计算航空发动机排气系统红外辐射的效率较高。

(2) 增加射线数可提高计算精度, 但会导致计算时间增加, 射线数达到 4×10<sup>5</sup> 以上时, 计算效率较高。

(3) 与射线携带单个波段能量的方法相比, 射线携带多个波段能量的方法可大幅缩短计算时间。3~5 μm 波段可缩短 24~28 倍, 4~4.5 μm 波段可缩短 12~16 倍。并行计算可进一步缩短 BMC 法的计算时间, 但并行效率随着计算核心的增加而下降。

### 参考文献:

- [1] Modest M F. Backward Monte Carlo simulations in radiative heat transfer[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125: 57-62.
- [2] 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.
- [3] Qi Hong, Wang Dalin, Huang Xizhen, et al. Development of a general multi-flux method for simulating the radiative intensity [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(7): 1204-1206. (in Chinese)  
齐宏, 王大林, 黄细珍, 等. 求解任意方向辐射强度的广义多流法[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(7): 1204-1206.
- [4] Liu L H. Benchmark numerical solutions for radiative heat transfer in two-dimensional medium with graded index distribution [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and*

- Radiative Transfer*, 2006, 102(2): 293–303.
- [5] Liu L H. Backward monte carlo method based on radiation distribution factor[J]. *J Thermophysics*, 2003, 18(4): 151–152.
- [6] Shuai Y, Dong S K, Tan H P. Simulation of the infrared radiation characteristics of high-temperature exhaust plume including particles using the backward Monte Carlo method [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 95(2): 231–240.
- [7] Jianwei L, Qiang W. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(5): 493–497.
- [8] Huang Wei, Ji Honghu. Computational investigation of infrared radiation characteristics of exhaust system based on BRDF[J]. *Acta Aeronautica et astronautica Sinica*, 2012, 33(7): 1227–1235. (in Chinese)  
黄伟, 吉洪湖. 基于 BRDF 的排气系统红外辐射特征计算研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(7): 1227–1235.
- [9] Chai Dong, Fang Yangwang, Tong Zhongxiang, et al. Numerical simulation on infrared radiation characteristics of scramjet nozzles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2300–2307. (in Chinese)  
柴栋, 方洋旺, 童中翔, 等. 超燃冲压发动机喷管红外辐射特性数值模拟[J]. *航空学报*, 2013, 34(10): 2300–2307.
- [10] Qi Xueqin, Wang Pingyang, Zhang Jingzhou, et al. Reverse Monte Carlo simulation on infrared radiation of lobed nozzle/mixer plume [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(8): 1229–1232. (in Chinese)  
亓雪芹, 王平阳, 张靖周, 等. 反向蒙特卡罗法模拟波瓣喷管的红外辐射特性 [J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(8): 1229–1232.
- [11] Fureby C, Henriksson M, Parmhed O, et al. CFD predictions of jet engine exhaust plumes[R]. AIAA 2008–3727, 2008.
- [12] Wang K C. Prediction of rocket plume radiative heating using backward Monte-Carlo method [R]. AIAA 93–0137, 1993.