

火焰筒内燃气辐射的蒙特卡罗法计算*

北京航空航天大学 张建强** 朱谷君

【摘要】 用概率统计方法计算了航空发动机燃烧室火焰筒内燃气对壁面的辐射热流, 计算中考虑了燃气的辐射及吸收特性。该计算程序适用于二维轴对称的环型燃烧室和单管燃烧室辐射热流的计算, 并对计算结果进行误差分析。介绍了算例计算结果, 为了检验该计算程序的可靠性, 对角系数进行了校核计算, 其结果是令人满意的。此外, 文中还介绍了对某环型燃烧室和一假想单管燃烧室的计算及误差分析结果。

主题词: 火焰筒 辐射 传热 数值计算 蒙特卡罗法

分类号: V 235 14

1 计算模型

本计算把环型火焰筒或单管火焰筒的形状, 简化为内外两条斜线绕发动机轴线回转构成的腔体作为计算域, 当内腔斜线与轴线平行且半径为零, 同时置该壁的发射率为零, 即为单管火焰筒, 这样可使计算程序统一起来。图 1 为环型火焰筒的形体简化及其单元分割情况。

1.1 各单元体的发射

计算域内的燃气被划分成若干个环型立体单元, 筒壁被划分成若干个环型面积单元。各燃气单元是一个静止的辐射热源, 其辐射能向四面八方传递。各壁面单元有发射和吸收的性质, 通过该表面单元的发射和吸收能束数的统计, 可得出其辐射交换的热流密度。单位时间内燃气单元发射的辐射能量 $\Delta Q_{e,g}$ 据文献[1]有: $\Delta Q_{e,g} = 4\alpha E_b \cdot \Delta V$, 其中: E_b 是该单元燃气温度下的黑体辐射力, ΔV 是单元的体积, α 是该单元燃气的吸收系数, $\alpha = -\ln(1 - \epsilon_g)/s$ 其中 s 是平均射线长度, $s = 3.4V/A$ 。式中 V 为火焰筒的体积, A 为其表面积, ϵ_g 是燃气的发射率, 按照文献[2]的计算公式

$$\epsilon_g = 1 - \exp \left[-0.29 \cdot B_p (r \cdot s)^{0.5} T_g^{-1.5} \right] \quad (1)$$

其中 B 是亮度因子, p 是压力(Pa), r 是油气比, T_g 是燃气温度(K)。单位时间内筒壁单元发射的辐射能为:

$$\Delta Q_{e,w} = \epsilon_w \sigma T_w^4 \cdot \Delta A_w \quad (2)$$

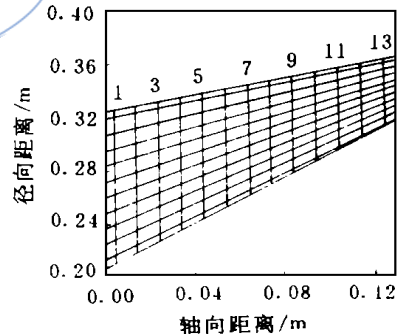


图 1 计算域网格划分

其中 ϵ_w 是壁面单元的发射率, σ 是斯蒂芬—波尔兹曼常数, T_w 是壁面单元的温度, ΔA_w 是壁面单元的面积。单位时间内所有燃气单元和壁面单元发射的总能量是

$$Q_e = \sum_{N_g} \Delta Q_{e,g} + \sum_{N_w} \Delta Q_{e,w} \quad (3)$$

其中 N_g 和 N_w 分别是燃气和壁面的单元数。

把总的发射能量视为由 N 个能束的发射, 每个能束具有能量 $\delta Q = Q_e/N$, 同时各个燃气单元和壁面单元分摊到的能束数 n_g 和 n_w 也可确定

$$n_g = \Delta Q_{e,g}/\delta Q, \quad n_w = \Delta Q_{e,w}/\delta Q \quad (4)$$

1.2 能束的传递

每一个能束发射后, 其射程和方向由 3 个随机数确定。有关射线计算的各式见表 1, 表中各参数见图 2 所示。根据射线的发射点位置和射线的长度及方向, 可以确定射线的终点位置。射线到达终点位置前可能已与筒壁相交, 或者从火焰筒的进口、出口越出计算域; 当然射线也可能不与计算域边界相交而终止于某气体单元。若射线由进出口越出, 则该能束的计算终止。若射线与筒壁相交, 需判断壁面单元是吸收还是反射, 判断的方法是再取随机数 $RAN\ 3$, 用壁面单元的发射率 ϵ_w 与 $RAN\ 3$ 比较, $\epsilon_w \geq RAN\ 3$ 吸收, $\epsilon_w < RAN\ 3$ 反射。如能束被吸收, 则终止对该能束的跟踪。若能束被反射, 则由该壁面单元为起点, 用射线的剩余长度为射程, 并另取随机数 $RAN\ 1$ 、 $RAN\ 2$ 决定反射方向 θ 和 φ 继续跟踪直至能束被吸收或越出。若射线终止于气体单元, 由于燃气被视为单纯的辐射热源, 在热平衡条件下, 该单元若吸收一个能束, 必将同时增加一个发射能束(除了本身发射的能束以外)。

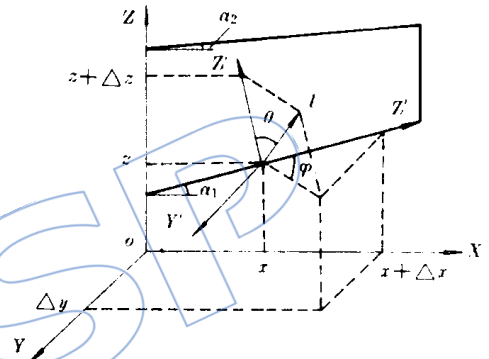


图 2 坐标及参数示意图

表 1 射线计算公式

	内壁发射	外壁发射	气体单元发射
射线长 l	$-\ln(1 - RAN\ 3)/\alpha$	$-\ln(1 - RAN\ 3)/\alpha$	$-\ln(1 - RAN\ 3)/\alpha$
周向角 φ	$2\pi \cdot RAN\ 2$	$2\pi \cdot RAN\ 2$	$2\pi \cdot RAN\ 2$
法向角 θ	$\cos^{-1} \sqrt{1 - RAN\ 1}$	$\cos^{-1} \sqrt{1 - RAN\ 1}$	$\cos^{-1} (1 - 2RAN\ 1)$
壁面斜角	α_i	α_e	
X 向增量 ΔX	$l \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\alpha_i - l \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha_i$	$l \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\alpha_e + l \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha_e$	$l \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi$
Z 向增量 ΔZ	$l \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha_i + l \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha_i$	$-l \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha_e + l \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha_e$	$l \cdot \cos\theta$
Y 向增量 ΔY	$l \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$	$l \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$	$l \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$

注: $RAN\ 3$ 、 $RAN\ 1$ 、 $RAN\ 2$ 为随机数; α 为吸收系数。

因此在计算中, 当射线终止于气体单元时, 则由该气体单元为始点, 继续取随机数对能束进行跟踪, 直至它被壁面吸收或越出计算域为止。

1.3 壁面辐射热流密度与误差分析

全部能束跟踪完毕后, 各壁面单元吸收的能束数, 减去该单元发射的能束数, 其结果乘以 δQ 就是壁面单元的辐射热流密度。计算中用一万个能束作为一次抽样计算, 由于随机数不同, 每次抽样计算的结果也不相同, 如果进行 n 次抽样计算, 根据总体正态分布规律^[4]

$$P\{|\bar{q} - E|/(S/\sqrt{n})\} \leq t_{1-\beta/2}(n-1)\} = 1 - \beta \quad (5)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2$$

上式中 $\bar{q}$ 是抽样结果的平均辐射热流密度, E 是辐射热流密度的期望值, S^2 是样本方差, $1 - \beta$ 是置信水平, 可根据计算所要求的精度选取, 根据选取的置信水平和抽样次数 n 就可以查取 $t_{1-\beta/2}(n-1)$ 的值。公式(5)表明, 平均辐射热流密度 $\bar{q}$ 与期望值的偏差, 以 $(1 - \beta)$ 的概率落在 $\pm t_{1-\beta/2}(n-1) (S/\sqrt{n})$ 范围内。定义相对偏差 ERROR 为

$$\text{ERROR} = t_{1-\beta/2}(n-1) (S/\sqrt{n}) / \bar{q} \quad (6)$$

最后可将 n 次抽样计算结果用 $\bar{q}$ 和 ERROR 来表示, 其置信度为 $(1 - \beta)$ 。

2 计算结果

2.1 角系数计算

为了检验计算程序的正确性, 首先计算了一个圆筒套管的角系数, 其输入数据为: 套管长 0.1m; 内筒半径 0.05m; 外筒半径 0.1m; 内筒母线与轴线夹角 0; 外筒母线与轴线夹角 0; 内外筒表面黑度 1.0; 内外筒壁温 1000K; 吸收系数 A_{KP} 改置为 $1 \cdot E - 10$ 。

统计外筒壁所发射的能束中, 由内筒壁吸收的部分就是外筒壁对内筒壁的角系数 FTB ; 统计外筒壁发射而由外筒壁自身吸收的部分, 可得外筒壁自身的角系数 FTT ; 统计外筒壁发射而由前端圆环面逸出的部分, 可得外筒壁对前环面的角系数 FTL ; 同样可得外筒壁对后环面的角系数 FTR 。同理, 可得出内筒壁对外筒壁、前后端圆环面的角系数, 即 FBT 、 FBL 和 FBR 。

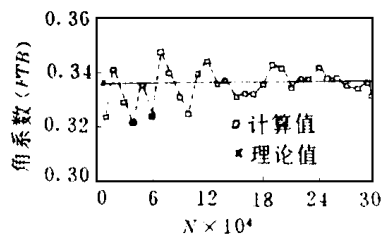


图3 角系数的计算值与理论值比较

图3是角系数 FTB 的计算结果, 图中的实线是精确解, 虚线是统计计算结果。从图可看出, 随着发射总能束数 N 的增大, 计算值的起伏幅度趋于减小, 并不断向精确值靠拢。可以预期当 N 趋于无限大时, 计算结果将收敛于精确值。这个计算说明该计算方案和计算程序可用。

2.2 环型燃烧室的计算

用本程序计算了某环型燃烧室中的辐射热流分布。火焰筒的形状输入数据是: 火焰筒在发动机轴线上的投影长度 0.13m; 内筒起点半径 0.207m; 外筒起点半径 0.324m; 内筒母线与发动机轴线的夹角 39.85° ; 外筒母线与发动机轴线的夹角 16.5° ; 燃气的压力和温度等参数根据文献[3]所用的数据输入。

每次用 10^4 个能束去计算筒壁的辐射热流密度, 图4给出了当抽样次数为 20 时, 内筒壁的平均辐射热流密度的分布, 从图4可以看出内筒壁辐射热流密度的分布大体形状和数值, 这种形状和数值的分布除了与燃气的温度、压力分布等参数有关外, 在进出口部分还与筒壁单元面向燃气的程度有关, 即受到燃气的照射程度有关。

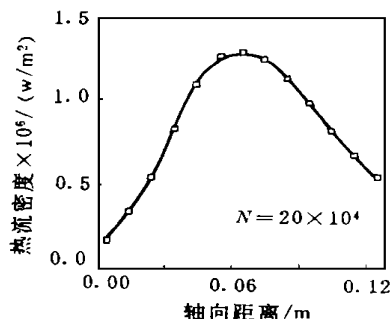


图 4 辐射热流密度沿发动机轴向的分布

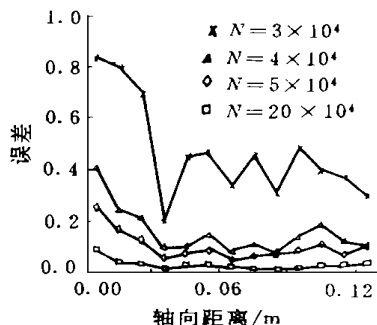


图 5 发动机轴向上不同计算点的计算误差

上述的统计误差分析结果, 见图 5。从图 5 可看出, 对于环型燃烧室, 内筒壁在进口处的热流密度较小而相对偏差较大(同样的计算可知, 外筒壁在出口处的热流密度较小而相对偏差较大, 本文从略)。总能束数为 20 万个时, 除了内筒壁进口处以外, 全部热流密度的相对偏差均已小于 $\pm 5\%$ 。

2.3 单管燃烧室的计算

形状输入数据: 燃烧室长度 0.25m, 筒壁半径 0.075m。这是一个设想的火焰筒, 燃气参数与前述环型燃烧室一样(因为单元分割数相同, 用对应单元的参数输入)。计算结果见图 6 和

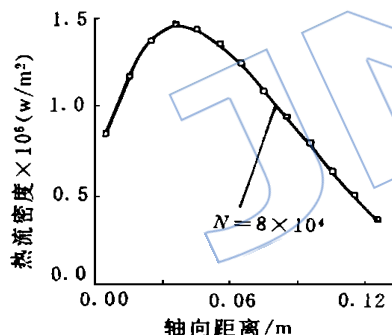


图 6 辐射热流密度沿轴向的分布

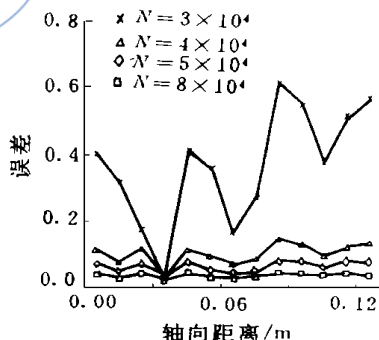


图 7 轴向不同计算点的计算误差

图 7。因为单管火焰筒的形体比较简单, 总能束为 8 万个时, 平均热流密度与期望值的相对偏差已均小于 $\pm 5\%$ 。

参 考 文 献

- 1 西格尔 R, 豪厄尔 J R, 曹玉璋等译 热辐射传热 北京: 科学出版社, 1990
- 2 Lefebvre A W. Gas Turbine Combustion New York: McGraw Hill Book Company, 1983
- 3 袁克彪 某发动机火焰筒气膜冷却壁温计算和优化: [学位论文] 北京航空航天大学, 1990
- 4 黄午阳 概率统计初步 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984

(责任编辑 杨再荣)