

热空腔—喷气流的组合辐射

北京航空航天大学 徐南荣** 朱谷君

【摘要】 讨论了热空腔(喷气发动机的加力筒)和喷气流的组合辐射问题,推演了组合辐射的辐射传输微分方程,导出了有边界辐射条件下的解。讨论了由多个温度不同的壁面组成且腔内充满高温燃气的热空腔辐射传输方程解的具体形式,导出了它向后半球的光谱辐射强度的表达式;同时还推导了热空腔—喷气流组合辐射的光谱辐射强度的表达式。最后给出算例,算例结果表明,热空腔—喷气流组合辐射的空间分布具有与实测分布较一致的梨形包络,其光谱分布也与实测的光谱分布的一致性较好。

主题词: 辐射 喷气发动机 输运方程

分类号: V231.1 O414.1

美国红外物理学者小哈得逊的著作^[1]中,曾将喷气发动机喷口内热空腔向后半球的辐射,假设为一个灰体,按照假设计算出的热空腔辐射与实测结果相比,有两点较大差异,一是绝对值较小,二是不出现实际存在的辐射强度空间分布的梨形包络。经分析热空腔内的温度分布的非均匀性,腔体内热燃气的影 响,离开喷口的射线与高温喷气流的相互作用均会对飞机后半球的辐射强度的空间分布及光谱分布产生重大影响。本文将在下面分别讨论充有高温燃气且腔壁温度为非均匀分布的热空腔辐射及热空腔—喷气流的组合辐射问题。

1 热传输方程

在热空腔辐射中,空腔壁面的辐射经过热燃气后向喷口后方辐射;在热空腔—喷气流组合辐射中,可将热空腔通过喷口向飞机后半球的辐射看成发自喷口处一块假想平板的辐射。因而在热空腔辐射中解辐射传输方程的边界辐射条件为热空腔壁面的辐射,而在热空腔—喷气流辐射问题中,边界辐射条件为上述喷口处的假想平板的辐射。

当辐射在具有耗散性和发射性介质中传输时,其传输方程可写为^[2]

$$\frac{dL_v}{dt} = L_v - \frac{k_\alpha}{k} L_v^o - \frac{1}{4\pi} \frac{k_s}{k} \int_{4\pi} L_v(\theta', \varphi') p(\theta, \varphi; \theta', \varphi') d\omega \quad (1)$$
$$k = k_s + k_\alpha, \quad dt = -k\rho ds, \quad t = \int k\rho ds$$

式中: k 为包括吸收和散射的总衰减系数; k_α 为吸收系数,吸收系数是温度和波数的函数^[3]; k_s 为散射系数; ρ 为耗散分子的密度; L_v 为研究点处在辐射传输方向 s 的光谱辐射亮度,下标 v 为波数; L_v^o 为由普朗克函数决定的黑体光谱辐射亮度; ω 为立体角; t 为光学深度; p 为散射相函数,它表示在某一方向的实际散射分量与各向同性的散射分量之比,即:

$$\rho(\theta, \varphi) = \frac{L_{v,s}(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} L_{v,s}(\theta, \varphi) d\omega} \quad (2)$$

式中 $L_v(\theta, \varphi)$ 表示在 (θ, φ) 方向实际散射的光谱辐射亮度。

在燃烧较完全的喷气流内, 散射系数 k_s 远小于总衰减系数 k , 式(1)可简化为

$$dL_v/dt = L_v - L_v^o \quad (3)$$

在解热空腔的辐射中, 只要沿射线从壁面 a 到喷口平面的 s 点处(见图 1a)积分求解(3)式; 在热空腔—喷气流组合辐射中, 只要沿射线从假想平板处的 a 点到任一点 s (见图 1b)积分求解(3)式, 就可以得到两个问题的共同解为

$$L_v(\nu, s) = L_v(\nu, a) e^{-t(\nu, a)} - \int_a^{(s)} L_v^o(\nu, s') \frac{\partial}{\partial s} \tau(\nu, s', s) ds' \quad (4)$$

由 t 的表达式、Beer-Bouguer 定律的透过率 τ 及 $\partial\tau/\partial s$ 的关系式, (4)式可改写为

$$L_v(\nu, s) = L_v(\nu, a) \tau(\nu, a, s) - \int_a^{(s)} L_v^o(\nu, s') \frac{\partial}{\partial s} \tau(\nu, s', s) ds' \quad (5)$$

上式即为包含有高温燃气的热空腔辐射或热空腔—喷气流的组合辐射在 s 点处的光谱辐射亮度的表达式。

2 热空腔辐射和热空腔—喷气流组合辐射

在所举的算例中的涡轮喷气发动机的加力筒的简图如图 2 所示。该热空腔由多个(图中为 10 个)温度不同的壁面组成, 每个壁面的温度各视为均匀的。这些壁面的辐射可在飞机的后半球通过喷口而观测到, 壁面均按灰体和漫反射体处理。

所研究的近、中红外波段内, 燃气的辐射主要考虑由 CO_2 及 H_2O 产生的。

对热空腔, (5)式可写为

$$L_v(\nu, s) = \epsilon L_v^o(\nu, a) \tau(\nu, a, s) - \int_a^{(s)} L_v^o(\nu, s') \frac{\partial}{\partial s} \tau(\nu, s', s) ds' \quad (6)$$

式中 ϵ 为腔壁的有效发射率。上式即为喷口截面的单元面积 ΔA 上(见图 2b)沿射线 $a-s$ 方向通过的光谱辐射亮度。此辐射亮度乘以 ΔA 在与射线相垂直方向的投影面积, 即可得到通过 ΔA 的光谱辐射强度 ΔI_v 。累计喷口截面上各单元面积的 ΔI_v , 就可得到热空腔在给定观测方向的总的光谱辐射强度 $I_{v,cav}$

$$I_{v,cav} = \sum_{j=1}^N \epsilon L_v^o(\nu, a) \tau(\nu, a, s) \Delta A_j \cos \alpha_j - \sum_{j=1}^N \Delta A_j \cos \alpha_j \sum_{i=1}^M L_v^o(\nu, s') \{ \tau(\nu, s) - \tau(\nu, s - \Delta s) \} \quad (7)$$

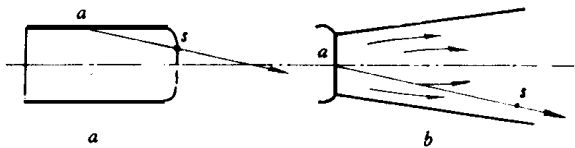


图 1 射线路径

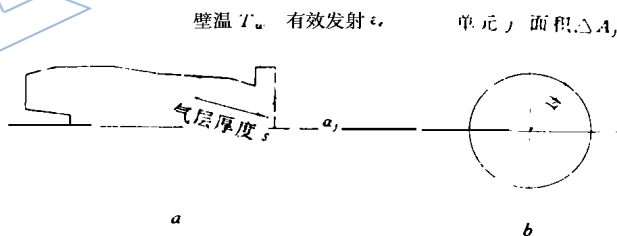


图 2 加力筒热空腔简图

式中 i 为沿射线 $a-s$ 方向计算 τ 时的分段数, j 为喷口截面所分的 ΔA_j 的数。在给定波段内的热空腔辐射强度 $I_{cav} = \int_{\Delta\nu} I_{\nu, cav} d\nu$ 。

在热空腔—喷气流组合辐射情况下, (7) 式中右边第一项的 $L_{\nu}(\nu, a)$ 即为喷口截面处在研究方向的光谱辐射亮度。热空腔—喷气流组合辐射强度由 (7) 式中的两部分组成, 即由喷口假想平板的辐射强度经喷气流的射线行程 $a-s$ (见图 1a) 的衰减后的值 $I'_{\nu, cav}$ 及整个喷气流在该方向形成的辐射强度 $I_{\nu, plu}$ 相加而成。

$$I'_{cav} = I_{\nu, cav} \tau(\nu, a, s) \quad (8)$$

而喷气流在 s 方向形成的辐射强度, 则需先求出该观测方向上距离 R 处的光谱辐照度 H_{ν}

$$H_{\nu} = - \int_0 \int_{\Omega} L'_{\nu}(\nu, s') \frac{\partial}{\partial s} \tau(\nu, s', s) \cos \theta ds' d\Omega \quad (9)$$

式中 Ω 为喷气流对观测点 M 所包的立体角, θ 为 $d\Omega$ 中心线与观测面法线的夹角。

假设此 H_{ν} 是由位于喷口中心的一个点辐射源形成的, 由此就可求出此假想点源的光谱辐射强度 $I_{\nu, plu}$

$$I_{\nu, plu} = H_{\nu} R^2 / \tau_a \quad (10)$$

式中 τ_a 为喷气流边界至观测点 M 的大气透过率。将 (8)、(10) 两式的结果求和, 即可得热空腔—喷气流组合辐射的光谱辐射强度。再对所研究的波段积分, 即可得研究波段内的辐射强度。

3 算 例

对装有喷气发动机的一种飞机在地面静止, 发动机工作状态为额定时在近中红外波段内 ($\nu = 2100 - 5260 \text{ cm}^{-1}$) 的后半球红外辐射场进行了计算。图 3 所示为计算所得的后半球的辐射强度相对值的空间分布图, 图中曲线 A 为单独热空腔辐射, B 为热空腔辐射经喷气流衰减后的辐射分布, C 为热空腔—喷气流的组合辐射。图中 D 则为该机在相同工作状态下测量所得的后半球辐射的空间分布值 (但测量的波段比计算波段稍宽, 为 $1760 - 5260 \text{ cm}^{-1}$)。从图可见, 计算所得的热空腔—喷气流组合辐射的空间分布出现了明显的梨形包络特征, 它与测量所得的空间分布在包络外形及绝对值上都较接近, 在峰值方向 (与喷管对称轴成 15° 的方向) 的辐射强度的计算值与测量值之差为 6%。

图 4 和图 5 是热空腔—喷气流组合辐射在喷管对称轴方向的计算光谱分布图及实测光谱图。从图可见, 它们的光谱分布的一致性较好, 只是实测的光谱分布分辨率还不足以达到能把计算光谱分布图的尖峰反映出来。如果将计算光谱图中在波长 $4.2 \mu\text{m}$ 附近的尖峰部分去除, 并仍然以相

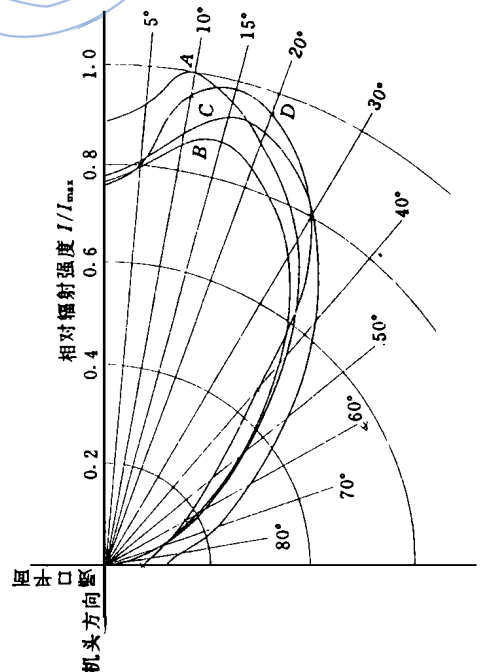


图 3 辐射强度相对值的空间分布

对值示出其图形(见图 6),则它与实测光谱图的形状更为接近。

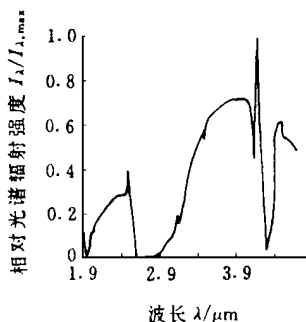


图 4 计算光谱的相对值分布

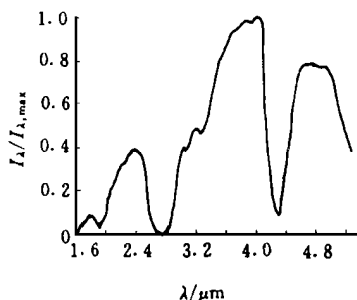


图 5 实测光谱的相对值分布

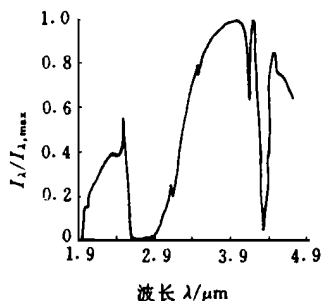


图 6 去尖峰后计算光谱的相对值

图 7 是在与对称轴成 60° 方向的计算光谱分布图。从图 7 和图 4 的对比可以看出,在 60° 方向的热空腔辐射量明显降低,而喷气流在二氧化碳的 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的波段内的辐射量相对地增加得较大。从图上可见,经过一定距离(本算例的计算传输距离为 500 m)后,水蒸汽的 $2.7 \mu\text{m}$ 为中心的辐射被大气衰减得几乎没有了。这是因为计算的飞行条件为地面静止,地面的水气含量较高,故而喷气流的这部分辐射被大气中的水气大量地吸收了。

4 结 论

(1) 喷气飞机后半球的红外辐射计算不宜简单地处理为位于喷口平面处的假想灰平板,而应视为由壁温分布不均匀且计及腔内高温燃气效应的热空腔—喷气流的组合辐射为宜。

(2) 提出的组合辐射的计算方法及算例表明,喷气飞机后半球红外辐射的空间分布的包络确为实测所得的梨形包络,其峰值辐值方向并不在喷管的对称轴方向。

(3) 辐射量的光谱分布随辐射方向的不同而不同。当辐射方向与喷管对称轴的夹角增大时,喷气流在 $4.3 \mu\text{m}$ 附近的辐射的相对量就增加。(4) 组合辐射中水气的辐射($2.7 \mu\text{m}$ 附近),由于大气吸收,在不长的传输距离后就有很大的衰减。

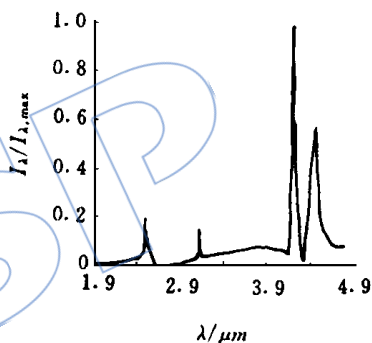


图 7 成 60° 方向的计算光谱相对值

参 考 文 献

- 1 Richard D, Hudson Jr. Infrared System Engineering. Chapter 3, John Wiley & Sons, New York, 1969
- 2 徐南荣. 喷气流红外辐射场的数值计算. 航空学报
- 3 Ludwig C B, et al. Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases. NASA SP- 3080

(责任编辑 杨再荣)

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON TURBULENT CHARACTERISTICS IN COUNTERROTATING AIRFLOW FIELD

Huang Xuemin, Wang Hongming, Zou Zhengping

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

Fluctuating velocity, turbulence intensity and the fluctuating frequency of turbulent airflow within a counterrotating airflow field were investigated experimentally with hot-wire anemometers. It is showed that turbulence intensity and fluctuating velocity are very large in the boundary layer region, where counterrotating airflow mixes violently; after mixing, the turbulence intensity of swirling airflow decreases and distributes uniformly in radial direction; various eddy scales exist in airflow field, the fluctuating frequency band is very wide without main frequency.

Key words Fluctuating velocity Flow fields Turbulent flow

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECTS OF BACKGROUND ON TARGET INFRARED RADIATION MEASUREMENTS

Wei Fuqing

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The effects of background on target infrared radiation measurements were investigated experimentally by means of background treatment and under different meteorological conditions. Some suggestions are offered for eliminating the effects of the background and improving the infrared radiation measurement of the target, as well as for recording meteorological conditions to correct the infrared radiation measurements.

Key words Infrared radiation Measurements Restraints

THERMAL CAVITY- PLUME COMBINATION RADIATION

Xu Nanrong and Zhu Gujun

(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The problem of thermal cavity (afterburning cylinder of a jet engine) and plume combination radiation is considered. The radiative transfer differential equation was derived. The solution of the differential equation was then obtained under the radiative boundary conditions. The detailed solution of radiative transfer equation was elaborated for a thermal cavity, filled with high temperature gas and surrounded with multiple walls of different temperatures. The detailed spectral radiant intensity expression was also given for the back hemisphere. Then a spectral radiation intensity expression was also derived for the thermal cavity-plume combination radiation. Finally a numerical example was given. Its results show that the spatial distribution of the thermal cavity-plume combination radiation has a pear shape just like that of measurements. The spectral distribution is also consistent with measurements.

Key words Radiation Jet engines Transport equation