

某型航空发动机喷管红外辐射特征 数值模拟和试验研究

邓洪伟¹, 邵万仁¹, 周胜田¹, 刘友宏²

(1. 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)



邓洪伟 (1981), 男, 硕士, 从事发动机红外隐身及雷达隐身性能研究。

收稿日期: 2009-08-19

1 引言

目前, 红外制导导弹已经成为战斗机生存的最大威胁, 人们对现代战斗机红外隐身性能的要求也越来越高。发动机的封闭腔和尾喷流都具有很高的温度, 这就使发动机成为红外制导导弹探测的主要目标。发动机红外辐射强度的线性降低会造成飞机生存力指数成倍增大, 因此对发动机红外辐射特征的研究十分必要。

本文利用自编的红外辐射特

摘要: 基于 N-S 方程建立了某型发动机喷管及其喷流流场的数值计算模型, 利用辐射传输方程 (RTE) 积分法编制了红外辐射特征计算程序, 得到了此喷管在非加力状态下工作时的红外辐射特征分布, 同时利用模型试验测量得到该喷管的红外辐射特征分布。给出了在 3.0~5.0 μm 光谱范围内的红外辐射特征数值模拟结果和试验测量结果, 经比较表明: 数值模拟结果和试验测量结果吻合良好。

关键词: 喷管; 喷流; 红外辐射特征; 航空发动机; 数值模拟; 试验

Numerical Simulation and Experimental Investigation of Infrared Radiation Characteristics for an Aeroengine Exhaust Nozzle

DENG Hong-wei¹, SHAO Wan-ren¹, ZHOU Sheng-tian¹, LIU You-hong²

(1. Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The numerical models of an aeroengine exhaust nozzle and its jet flow field were built based on the Navier-Stokes equations. The infrared radiation characteristics of the exhaust nozzle at non-afterburning condition were obtained by infrared radiation characteristics calculation program compiled by the integrated method of the Radiation Transfer Equation (RTE). The infrared radiation characteristics of the modeled exhaust nozzle were measured by the test. The results of numerical simulation and measurement for infrared radiation characteristics for the exhaust nozzle in the spectrum range of 3.0~5.0 μm were given. The results show that the numerical simulation are in accord with the measurement.

Key words: nozzle; jet; infrared radiation characteristics; aeroengine; numerical simulation; experiment

征数值计算软件^[1]计算了某型航空发动机喷管红外辐射特征。首先建立了流场的数值模拟计算模型, 并进行了计算。在流场计算

数据基础上, 针对该喷管进行了试验研究, 测量得到了该喷管模型试验件的方向总红外辐射强度及 0°~90° 天顶角范围内的方向

红外光谱辐射强度分布。该测量结果成为数值模拟参考的重要数据,也为红外辐射特征数值模拟软件的修正提供了良好的依据。

经过数值模拟结果和试验结果的对比后发现,本文所用的红外辐射特征数值模拟软件的计算结果与试验结果吻合良好,为以后利用该软件对其它发动机喷管的红外辐射特征进行数值模拟提供了保障。

2 数学模型

2.1 流场计算模型

为了与模型试验结果进行比较,从而分析红外辐射计算软件的精度,流场计算几何模型喷管尺寸与试验模型的尺寸完全一致。

因为喷管具有轴对称性,所以选取对称平面作为计算对象。建立的轴对称喷管内外流一体化流场的2D计算区域,包含燃烧室、内外涵、喷管、排气系统机体外流。内外涵气流在中心锥前混合,到达喷管出口时,掺混基本结束。计算网格采用2D四边形结构化网格,空腔内网格很密,外流网格逐渐稀疏,在固壁附近网格进行加密处理,如图1、2所示。



图1 喷管和喷流计算域及网格

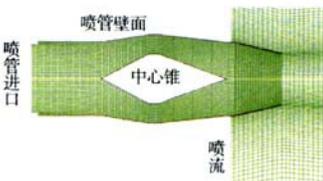


图2 网格局部放大

计算流场为稳态、可压缩。CFD算法采用基于密度的可压缩流求解器,N-S方程组的对流项离散格式采用2阶上风格式^[2],梯度的计算采用精度较高的以控制单元为基准的Green-Gauss理论,湍流模型采用SSTk- ω 模型,考虑了组分的影响,组分包含CO、CO₂、H₂O、NO、O₂、N₂。流场求解采用商业软件FLUENT进行。

2.2 红外特征计算模型

2.2.1 RTE的积分形式

按照Siegel和Howell^[3]关于辐射传热各术语的定义和标识,在吸收-发射性介质中辐射传输方程(RTE)的积分形式可以写成在光学厚度 k_v 处2项方向光谱辐射强度的叠加

$$i_v'(k_v) = i_v'(0) \exp(-k_v) + \int_0^{k_v} i_{v,b}' \exp[-(k_v - k_v')] dk_v' \quad (1)$$

式中:第1项是到达 k_v 处的被衰减后的入射方向光谱辐射强度;第2项是在路程方向上沿途整个厚度气体介质的自发发射的,再经过每一发射点 k_v' 到位置 k_v 之间的衰减所得到的方向光谱辐射强度;光学厚度 $k_v = \int_0^S K_v dS$, K_v 是气体的光谱吸收系数,燃气的光谱吸收系数等于H₂O、CO₂、CO、NO辐射组分的光谱吸收系数与各自的摩尔分数相乘结果之和。

2.2.2 封闭腔辐射传输

喷管的进口平面、平直段、喷管收缩段筒体、中心锥、喷口平面组成1个封闭腔(图2)。考虑气体介质参与的封闭腔辐射传输,根据式(1),可得喷管封闭腔内壁面

离散的各单元的光谱辐射力为

$$e_{v,ok} = \varepsilon_v \cdot e_{v,bk} + \rho_v \cdot \sum_{j=1}^N F_{kj} [e_{v,oj} \tau(k_v) + \sum_{i=1}^n e_{v,ib} (k_{v,b}^*) \{ \tau [k_v - (k_v^* + \delta k_v^*)] - \tau [k_v - k_v^*] \}] \quad (2)$$

式中: ε 、 ρ 、 F 、 τ 分别为辐射力、固体壁面发射率、固体壁面反射率、角系数和气体介质透过率 $\tau_v(S) = \frac{i_v'(S)}{i_v'(0)}$
 $= \exp \left[- \int_0^S K_v(S^*) dS^* \right]$, 下标 v 、 b 、 o 分别为波数、黑体和离开面元的辐射(out),下标 j 、 k 为离散的面元变量。透过率采用文献[3]的Bouguer定律进行计算。根据单元的光谱辐射力,一定光谱间隔 ν_1, ν_2 内的固壁单元的总辐射力只需在该光谱范围内积分

$$e_{o,k}(\nu_1, \nu_2) = \sum_{i=1}^n e_{v,ok} d\nu \quad (3)$$

2.2.3 喷流辐射传输

喷流的计算域为一圆柱形区域,包括喷管喷口所在的平面、由流场计算确定的出口平面和几乎不受喷流影响的圆柱形外边界表面,如图3所示。在图中, θ 表示天顶角, φ 表示周向角。当喷流红外辐射传输方向线的反向延长线与喷流计算域边界的交点位于喷管喷口内时,则该交点所在的离散单元沿该方向传输的方向光谱辐射强度为

$$i_v(\rho) = \frac{e_{v,ouplank}}{\pi} \tau(k_v) + \sum_{i=1}^n i_{v,ib}(k_{v,b}^*) \cdot \{ \tau [k_v - (k_v^* + \delta k_v^*)] - \tau [k_v - k_v^*] \} \quad (4)$$

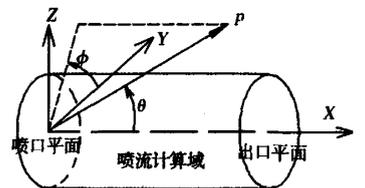


图3 喷流计算域

式中:第 1 项表示封闭腔从喷口平面第 k 个面元辐射出的方向光谱辐射强度传递到 p 点处的方向光谱辐射强度, $e_{\nu, \text{outplane}k}$ 由本文第 2.2.2 节根据射线的反向延长线与喷口平面交点所在的面元确定;第 2 项表示沿途吸收-发射性介质对 p 点处的方向光谱辐射强度的贡献。

当尾喷流红外辐射传递方向线的反向延长线与尾喷流计算域边界的交点没有位于喷口平面内时,则该交点所在边界的离散面元沿该方向 p 的方向光谱辐射强度为

$$i_{\nu}(p) = \sum_{i=1}^n i_{\nu}(k_{\text{nb}}) \cdot \left[\tau[k_{\nu} - (k_{\nu} + \delta k_{\nu})] - \tau[k_{\nu} - k_{\nu}^*] \right] \quad (5)$$

3 试验研究

3.1 试验原理及基本设备

试验目的是测量红外光谱辐射亮度,最后经积分公式得到辐射强度。该试验系统用于模拟涡扇发动机的排气系统^[4],如图 4 所示。主要由燃烧室、点火器、外涵低压鼓风机、内涵高压鼓风机、油泵、油箱、喷管模型等组成。喷管由 2 个同心的圆管组成,内管模

拟发动机的内涵通道,内管与外管之间形成的环形通道模拟发动机的外涵通道。内涵气流由高压鼓风机提供,其额定流量为 3130 m³/h,额定表压为 5460 Pa。为了方便地测量主气流流量,鼓风机的进气口设计为吸风喇叭喷管(文丘利管的 1 种特殊形式)。内涵吸入的空气进入单管燃烧室后,与燃油系统供应的航空煤油混合形成雾化混合气,经点火器点火燃烧,再由稳定法兰整流,在稳定室中得到稳定、均匀流场,最终喷入试验段。主流的温度由燃油量控制。外涵气流由低压鼓风机提供,其额定流量为 7850 m/h,额定表压为 3175 Pa。内、外涵 2 股气体在混合段发生掺混,最终由敞开口喷入大气。试验涵道比 $B=5$,通过调节高压风机与低压风机的流量来加以控制。在混合段的主流、次流气体进口处均布置了热电偶来测量气体的温度。在以喷管出口截面中心点为圆心,以 15 m 为半径的圆上安放 MR 系列傅里叶光谱辐射计。

3.2 红外辐射测量系统

红外辐射测量设备为 MR 系列傅里叶光谱辐射计,如图 5 所示。试验测量点的布置与测量方位的定义如下:在不同角度探测时,目标范围除了喷管热喷流外,还包含了部分喷管内壁面以及喷管内腔气体,实际得到的为组合辐射值。测量点角度的布置如图 6 所示,分别测量了尾喷管在 0°、5°、30° 和 90° 等 4 个探测方向上的红外辐射强度。

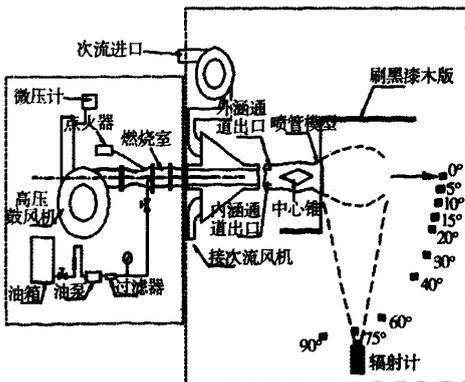


图 4 试验器和试验件



图 5 MR-系列傅里叶光谱辐射计

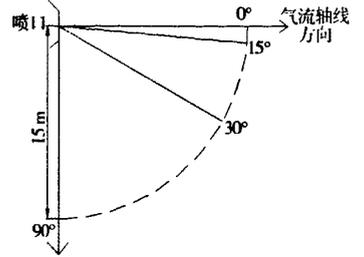


图 6 测量角度的布置

试验中采集参数为光谱辐射亮度 $L, W/(m^2 \cdot Sr \cdot \mu m)$ 、目标单位面积在单位波长内向单位立体角中发射的功率。

再由公式 $i_{\lambda} = L_{\lambda} \cdot A$ (A 为目标面积) 求出光谱辐射强度 $i_{\lambda}, W/(Sr \cdot \mu m)$ 的分布,最后通过 $i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i_{\lambda} d\lambda$ 光谱积分求出所研究波段内的辐射强度, λ_1, λ_2 分别为所研究的波段范围内波长下限与上限,本文中根据研究需要取分别为 3.0、5.0 μm 。

4 结果与分析

4.1 光谱辐射强度对比分析

根据上述喷管排气系统红外辐射强度理论,编制了 FORTRAN 源程序^[1],计算了某喷管封闭腔及其尾喷流的方向红外光谱辐射强度,红外辐射在大气中的传输采用 LOWTRAN7.0 进行计算,计算结果与本文的试验测量结果进行了比较。图 7~10 分别列出了某喷管和喷流的红外光谱辐射强度

在天顶角 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ 时的测量值与计算值的对比,图中光谱的波长范围为 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 。

从图7中可见,在 0° 方向的计算结果与实测的光谱辐射强度分布基本一致,喷管和喷流的红外光谱特性非常显著。

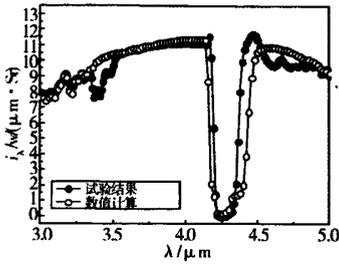


图7 在 0° 方向的光谱辐射强度

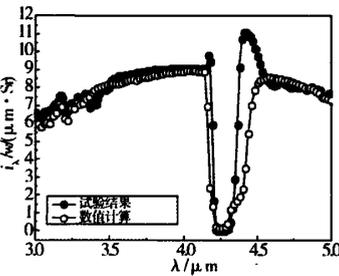


图8 在 5° 方向的光谱辐射强度

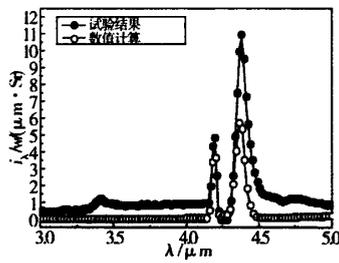


图9 在 30° 方向的光谱辐射强度

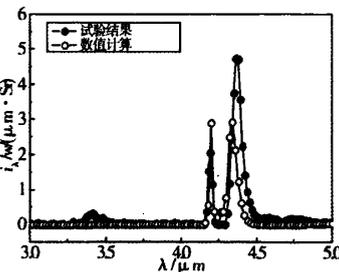


图10 在 90° 方向的光谱辐射强度
(1)在 $3.0 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的光谱区

间,试验测量光谱辐射强度曲线出现了一些明显波动,波动表现为一些明显的小波峰和波谷,这主要是由于 H_2O 在 $3.2 \mu\text{m}$ 有1个红外吸收带。分子中的 $-\text{OH}$ 基团若形成氢键时,基团的红外特征频率会向低频方向位移,因此在 $3.389 \mu\text{m}$ 左右试验测量值有一定吸收,数值模拟结果与试验测量结果基本吻合,但数值模拟中在 $3.389 \mu\text{m}$ 左右没有考虑频率移动的影响,因此没有反映此波长下的方向光谱辐射强度的变化,但这对方向总辐射强度的影响不大,可以忽略。

(2)在 $3.50 \sim 4.12 \mu\text{m}$ 的光谱区间,试验测量和数值模拟光谱辐射强度曲线大致都近似呈1条直线,这主要是大气中 H_2O 及 CO_2 在这个光谱区间的吸收作用非常小,固体壁面的辐射起主要作用,直线特性主要是固体辐射的作用。

(3)在 $4.12 \sim 4.60 \mu\text{m}$ 的光谱区间,试验测量光谱辐射强度曲线出现了2个非常明显的波峰和波谷,这是由于尾喷流的高温燃气本身吸收能量后又辐射出能量,形成1个大波峰,而大气中 CO_2 在 $4.30 \mu\text{m}$ 近似于全部吸收,造成波峰中间挖掉1个波谷,两端形成2个小波峰。数值模拟结果与试验测量结果基本吻合,在两端的2个小波峰处存在差异。

(4)在 $4.60 \sim 4.75 \mu\text{m}$ 的光谱区间,试验测量光谱辐射强度曲线在 $4.66 \mu\text{m}$ 左右出现了1个微小的波峰,这主要是由于 CO 吸收及辐射的峰值光谱约为 $4.66 \mu\text{m}$ 。由于本文数值模拟喷管进口 NO 、 CO 的质量分数假设为 1×10^{-6} ,数值很低,同时 LOWTRAN7.0 的

光谱分辨率略小于试验测量的,因此,数值模拟仅呈现出极微小的波峰。

(5)在 $4.75 \sim 5.00 \mu\text{m}$ 的光谱区间,光谱曲线出现了小小的波动,但总体上呈现出下降趋势。数值模拟结果与试验测量结果基本吻合,但波动趋势没有测量值明显。

从图8中可见,在 5° 方向的测量结果与计算结果总体分布上基本符合,分布规律也与 0° 方向的基本一致,只是在量级上要低一些,试验值在 $4.35 \mu\text{m}$ 左右的波峰有增强的趋势。图9是在天顶角为 30° 方向的红外光谱辐射强度分布规律,类似于图10中在天顶角为 90° 方向的红外光谱辐射强度分布,只是总体的辐射强度量级上要大一些。同时由图9中可见,测量位置的红外辐射强度分布完全不同于在 0° 方向的分布,呈现出典型的气体占主要作用的吸收、发射光谱特征。由于在 30° 方向喷管内壁面、中心锥等固壁辐射对测量位置的红外辐射强度的影响,在数值模拟中不能完全精确计算,所以,红外辐射强度测量值略大于数值模拟结果。

从图10中可见,在 90° 方向上的红外辐射强度的变化规律如下。

(1)在 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 的光谱区间,出现了3个峰值区间,在其它波段基本上没有辐射。这主要是在 90° 方向固体高温壁面全部被遮挡,没有固体连续性光谱的辐射,只有气体选择性吸收和发射。

(2)3个峰值波段分别为在 $3.25 \sim 3.50 \mu\text{m}$ 、 $4.13 \sim 4.20 \mu\text{m}$ 、

4.28 ~ 4.50 μm 的光谱区间。其中,在 3.25 ~ 3.50 μm 波段的辐射主要是由 H_2O 的吸收和发射形成的,在 4.13 ~ 4.20 μm 、4.28 ~ 4.50 μm 的光谱区间的 2 个波峰和波谷的形成是由于燃气中 CO_2 的发射和大气中 CO_2 在此波段的吸收形成的。

从图 7 ~ 10 中可见,固体辐射对测量位置处方向红外光谱辐射强度随着天顶角角度的增大而减小,气体发射对测量位置处方向红外光谱辐射强度随着天顶角的增大而呈现出先略增大后减小的趋势,这是由模型试验结构的特点造成的。

图 11 为距离尾喷流红外计算域出口边界 11 m 处,即喷管出口平面 15 m 处的试验测量位置。在试验条件下利用 LOWTRAN7.0 软件计算的大气透过率,在 3.0 ~ 3.5 μm 的光谱区间,水蒸气有一些微小的吸收而呈现出一些小波峰及波谷,在 4.25 μm 左右 CO_2 透过率很低,吸收系数很大,近似于全部吸收^[3,7]。

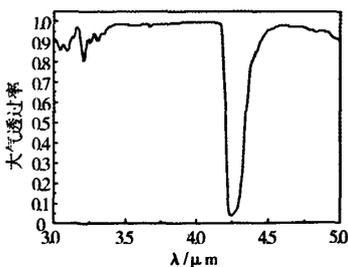


图 11 中纬度夏季大气透过率

4.2 总辐射强度对比分析

图 12 列出了喷管和喷流的方向总红外辐射强度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的测量值和计算值,二者分布规律基本一致。从图 12 中可以

看出:

(1) 在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的方向总红外辐射强度的测量值和计算值符合良好,方向总红外辐射强度相对很大,这主要是由喷管内高温固体壁面的强烈辐射作用造成的。

(2) 在 $10^\circ \sim 20^\circ$, 由于喷管内高温固体壁面被部分遮挡,方向总红外辐射强度分布陡降。

(3) 在 $20^\circ \sim 90^\circ$, 都经历了 1 个由平稳过渡到降低的过程。计算的方向总红外辐射强度在 90° 附近比试验测量值略大。

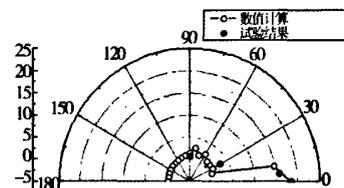


图 12 试验和数值模拟的方向总红外辐射强度比较

5 结论

航空发动机喷管方向红外光谱辐射强度的数值模拟结果和试验测量结果吻合良好,试验测量结果在一定程度上验证了数值模拟结果的正确性,本文编制的红外辐射计算程序基本能够反映航空发动机排气系统的红外辐射特征。从而基本掌握了某型喷管和喷流的红外辐射特征和光谱分布规律,具体可得到以下几点结论。

(1) 方向红外光谱辐射强度的分布在 3.0 ~ 3.5 μm 的光谱区间上大体上呈现出扰动式吸收,在 4.25 μm 左右呈现出大幅度吸收。当天顶角较小时,固体壁面的辐射起主导作用;随着天顶角的增大,固体壁面的辐射减弱,燃气

的辐射先略增强后减弱。在较大的天顶角上燃气辐射主要集中在 3.389 μm 左右、4.13 ~ 4.20 μm 和 4.28 ~ 4.50 μm 的光谱区间。

(2) 方向总红外辐射强度的分布在天顶角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向随着天顶角的增大而减少,其中在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 突然大幅度降低,在其它角度时的变化不大。

(3) 大气在 3.0 ~ 5.0 μm 的光谱区间有显著的光谱吸收特征,在 3.0 ~ 3.5 μm 的光谱区间水蒸气有一些微小的吸收,在 4.2 μm 左右由于 CO_2 的吸收作用而近似于全部吸收。

参考文献

- [1] 邓洪伟,邵万仁,周胜田.航空发动机排气系统红外辐射特征数值计算研究[J].航空发动机,2009,35(1).
- [2] Barth T J, Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes[R]. AIAA-89-0366, 1989.
- [3] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer (4th edition). Taylor & Francis[M]. New York, 2002.
- [4] 罗明东,吉洪湖.无加力涡扇发动机二元喷管的红外辐射特征试验[J].航空动力学报,2006,21(4):631-637.
- [5] Ludwig C, Malkmus W, Reardon J E, Thomson J A L. Hand-book of infrared radiation from combustion [R]. NASA-SP-3080, 1973.
- [6] 刘友宏,邵万仁,张锦绣.发动机排气系统及尾喷流的流场和红外特征数值模拟[J].航空动力学报,2008,23(4):591-597.
- [7] Homes D G, Connell S D. Solution of the 2D Navier-Stoke equations on unstructured meshes[R]. AIAA-89-0366, 1989.