

球面收敛二元喷管出口三角形锯齿 对气动和红外特性的影响

征建生¹, 张靖周^{1,2}, 单勇¹, 季靖远¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 通过数值计算研究, 分析了喷管出口锯齿修型对涡扇发动机排气系统球面收敛二元喷管气动及红外特性的影响。结果表明: 相对于基准喷管, 喷口锯齿修型均造成排气系统推力系数和总压恢复系数的下降, 且齿底角越大, 推力系数的损失越大。比较而言, 内缩型锯齿修型方式对排气系统气动性能的影响最小, 但导致排气喷流和总体红外辐射强度在 $\pm 15^\circ$ 探测角附近的较大增强; 外伸型锯齿修型对排气系统气动性能的影响最大; 30° 齿底角的等面型锯齿修型综合性能较优, 对推力系数和总压恢复系数的影响微弱, 同时在 $-30^\circ \sim 0^\circ$, $0^\circ \sim 30^\circ$ 的探测视角内体现出一定的红外辐射抑制作用。

关 键 词: 球面收敛二元喷管; 锯齿修型; 气动特性; 红外辐射; 排气喷流

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Influence of outlet delta-chevrons on aerodynamic and infrared characteristics of spherical convergent two-dimensional nozzle

ZHENG Jiansheng¹, ZHANG Jingzhou^{1,2}, SHAN Yong¹, JI Jingyuan¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical investigation was performed to study the influence of outlet delta-chevrons on the aerodynamic and infrared characteristics of a spherical convergent two-dimensional nozzle in turbofan engine exhaust system. Results showed that the trust coefficient and total pressure recovery coefficient decreased by the outlet shaped-chevrons in relative to the baseline nozzle, especially for the larger base angle of delta-chevron. By comparison, the inner-recessed-chevron mode had a least influence on the aerodynamic performance of exhaust system. However, it resulted in an obvious enhancement both for the exhaust plume and total infrared radiation at the detective angle in the vicinity of $\pm 15^\circ$. The outer-extended-chevron mode had a most influence on the aerodynamic performance of exhaust system. The equal-area-chevron mode with a base angle of 30° seemed to be advantageous, as it had a weak influence on the trust coefficient and total pressure recovery coefficient, and also showed certain infrared radiation suppression in the detective angles of $-30^\circ \sim 0^\circ$ and $0^\circ \sim 30^\circ$.

收稿日期: 2015-10-16

作者简介: 征建生(1991—), 男, 硕士生, 主要从事航空动力系统研究。

引用格式: 征建生, 张靖周, 单勇, 等. 球面收敛二元喷管出口三角形锯齿对气动和红外特性的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1328-1334. ZHENG Jiansheng, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong, et al. Influence of outlet delta-chevrons on aerodynamic and infrared characteristics of spherical convergent two-dimensional nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1328-1334.

Key words: spherical convergent two-dimensional nozzle; shaped-chevron; aerodynamic characteristics; infrared radiation; exhaust plume

球形收敛调节片二元矢量喷管是一种混合式轴对称/非轴对称推力矢量喷管,利用球形结构取代常规的二元喷管圆形矩形的过渡段,通过球面铰链实现喷管的俯仰与偏航控制,是一种先进的二元矢量喷管结构^[1-2]。

目前国内外针对球面收敛喷管的气动和红外性能已经展开一系列的研究^[3-6],王宏亮等^[7-8]数值研究了喉道宽高比、俯仰和偏航矢量角等结构参数对球面收敛二元矢量喷管缩比模型的气动及其红外性能的影响,研究中未考虑内外涵道气流混合以及喷管腔体内部的热构件。在排气喷管红外辐射特征控制中,基于突片强化混合机理的锯齿喷口已得到国内外研究人员的关注^[9-10],相关针对排气喷流发展^[11-14]以及红外辐射特征^[15-17]的研究表明,突片或锯齿可以有效缩减喷流的核心区长度,从而抑制排气喷流的红外辐射强度。潘丞雄等^[18]和李伟等^[19]数值模拟了锯齿冠形喷口对轴对称收敛喷管和二元喷管的气动及红外性能,研究表明相对于原始喷管,出口修型锯齿的形状不仅会改变气动及红外辐射特性,修型方向的差异也会导致结果迥异。

本文针对涡扇发动机全尺寸球面收敛二元矢量喷管排气系统结构参数,对无矢量情形下喷管出口锯齿修型进行数值研究,分析内缩型、外伸型和等面型锯齿修型方式以及锯齿结构参数对球面收敛二元喷管气动及红外辐射特性的影响。

1 物理模型

本文的研究建立在全尺寸涡扇发动机排气系统模型基础上,如图 1 所示,低温流体从外涵进入与流经涡轮后支板与火焰稳定器的内涵高温燃气混合进入尾喷管,再经球面收敛段,由喷管二元扩张段排出。模型总长度约为 2.45 m,外涵进口面积为 0.23 m²,内涵进口面积为 0.32 m²;喷管喉部截面面积为 0.226 8 m²,基准二元喷管喷口面积为 0.275 4 m²,宽度(W)与高度(H)之比为 2,如图 2(a)所示。本文在基准喷管出口采用 3 种锯齿修型方式,分别为内缩型、外伸型和等面型。内缩型是在基准喷管扩张段末端向内切齿,即锯齿的顶点位于基准喷管出口截面,如图 2(b)所示;外伸型是在基准喷管出口截面外接锯齿,如图 2(c)

所示;等面型是在基准喷管出口交替内切和外伸而形成锯齿修型,并保持扩张段表面面积不变,如图 2(d)所示,其中图中虚线为原始喷管出口位置示意图。本文采用的修型锯齿形状为等腰三角形,保持齿宽不变,改变锯齿的齿高或底角,结构参数如表 1 所示。

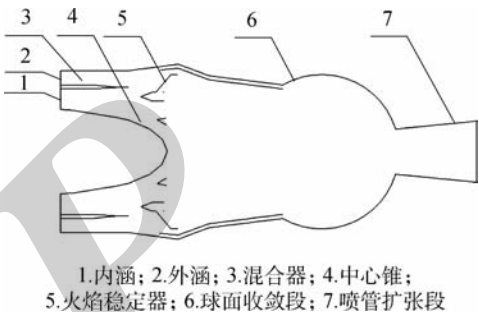
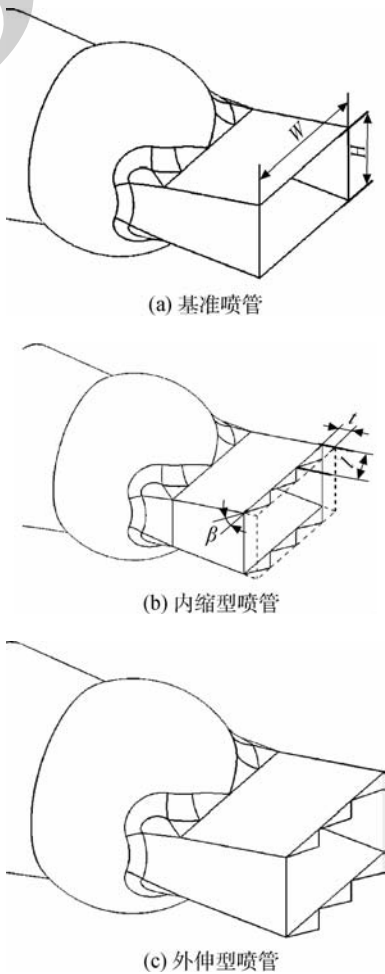
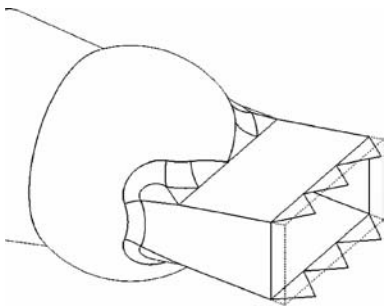


图 1 球面收敛二元喷管排气系统示意图
Fig. 1 Schematic of spherical convergent two-dimensional nozzle exhaust system





(d) 等面型喷管

图 2 锯齿修型喷管示意图

Fig. 2 Schematic of shaped-chevron nozzles

表 1 锯齿结构参数

Table 1 Structure parameters of chevron

模型	齿宽 l/mm	齿高 t/mm	齿底角 $\beta/(\text{^\circ})$
C1	268	232.1	60
C2	268	134.0	45
C3	268	77.4	30

2 数值计算方法

2.1 网格划分与边界条件

采用 Gambit-CFD 软件划分网格, 整个计算区域共整流段、尾喷管和外场 3 个部分组成. 考虑到涡扇发动机排气系统整体内部结构的复杂性, 特别是模型前段的内外涵混合器和火焰稳定器, 本文采用非结构化网格. 为了确认模型的网格无关性并得到最佳网格数, 本文对整个排气系统模型进行了网格独立性测试, 划分计算域网格分别为 240 万, 310 万, 380 万和 450 万, 520 万和 590 万, 网格数目的差异主要体现在壁面加密的范围和外场尺寸的疏密. 通过对计算结果的比对, 最终选定排气系统模型网格为 520 万. 最小网格尺寸设为 10 mm, 壁面采用局部加密的方法处理, 外部流场网格在 20~80 mm 之间.

计算采用的边界条件如下: 外涵道和内涵道入口采用质量流量进口, 给定质量流量, 其中内涵道流量为 100 kg/s, 总温为 1140 K, 外涵道流量为 30 kg/s, 总温为 470 K. 由于喷管出口处的压力并不是外界大气压力, 且出口截面流动并未充分发展, 在尾喷管出口处外选取尺寸为模型 10 倍的区域, 外场边界设定为外界大气压力, 外场边界为压力出口, 选为模拟地面状态的环境压力(101325 Pa)和环境温度(289 K). 固体壁面采用无滑移固壁边界条件, 排气系统内部各部件设定为流-固耦合面, 所有壁面的发射率假设为 0.75.

在计算时加入组分运输模型以确定排气系统

的气体组分分布. 假设喷管内涵入口气体为完全燃烧的燃气, 成分主要为氮气、二氧化碳及水蒸气, 质量分数分别为 0.706 04, 0.208 62 和 0.085 34; 外涵进口气体为空气, 成分主要为二氧化碳及氮气, 质量分数分别为 0.233 和 0.767. 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、近壁区采用标准壁面函数进行湍流流场分析. 流动传热控制方程采用 2 阶迎风差分格式离散, 压力与速度耦合采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equation)算法, 各变量的收敛精度均设为 10^{-6} .

2.2 红外辐射特性计算

排气喷流及喷管腔体的红外辐射计算采用正反射线迹法, 详细的计算方法参见文献[20-22], 本文主要考虑 3~5 μm 波段的红外辐射. 如图 3 所示, 探测点分布在喷管水平和垂直对称面内的圆弧上, 探测距离为 60 m. 0° 探测角正对排气系统轴线, 红外传输过程不考虑大气的衰减效应.

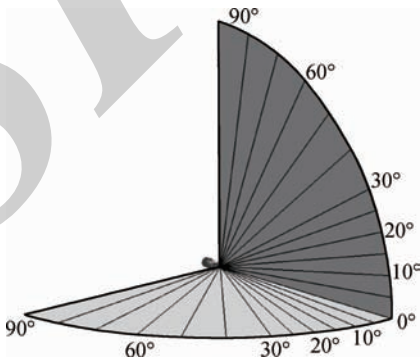


图 3 红外辐射探测点的空间分布示意图

Fig. 3 Schematic of spatial distribution of infrared radiation monitor points

3 计算结果及分析

3.1 气动特性

图 4 为喷管出口下游排气喷流的马赫数分布. 可以看出, 外伸锯齿对喷流尾迹区马赫数分布的影响相对较大. 相对于基准喷管, 内缩锯齿修型是在基准喷管扩张段末端向内切齿, 对喷管扩张段的“等效”长度影响很小, 排气喷流在扩张段中的膨胀程度并没有发生明显改变, 因此对排气喷流下游发展的流场影响较小; 外伸锯齿由于增加了喷管扩张段的“等效”长度, 导致排气喷流在外伸锯齿扩张段继续膨胀, 并促使气流在喷管出口下游继续加速, 从而形成较为明显的交替膨胀压缩波节, 同时尾焰核心区掺混加剧, 使得喷管出口下游马赫数的衰减也略有增强. 等面锯齿虽然

保持扩张段表面面积与基准喷管一致,但由于锯齿的部分外伸,使得其扩张段的“等效”长度有所增加,因而喷管出口下游马赫数的衰减也高于大于内缩锯齿修型喷管.图 5 为喷管出口下游排气喷流中心线温度分布,图中横坐标 x 以基准喷管

出口中心点为起始点,纵坐标 y 为喷管扩张端窄边方向坐标,此图也反映了喷口锯齿修型对热喷流发展的影响.

对于排气系统而言,总压恢复系数、推力系数和气动推力矢量角等是反应矢量喷管排气系统气动性能的主要参数.针对考虑内、外涵进气的排气系统,它们分别定义如下:

总压恢复系数 σ

$$\sigma = \frac{m_{\text{out}} p_{\text{out}}}{m_{\text{in1}} p_{\text{in1}} + m_{\text{in2}} p_{\text{in2}}} \tag{1}$$

喷管推力系数 C_f

$$C_f = \frac{F}{F_i} \tag{2}$$

式中 p_{out} , p_{in1} 和 p_{in2} 分别为喷管出口和内、外涵进口的质量平均总压值; m_{out} , m_{in1} 和 m_{in2} 分别为相应的平均质量流量; F 为喷管实际推力, F_i 为通过一维等熵公式计算出的理论推力.

图 6 反映了 3 种锯齿修型方式的推力系数与总压恢复系数随着齿底角的变化趋势.从图中可以看出,相对于基准喷管,3 种锯齿修型方式均造成排气系统推力系数的下降,且齿底角越大推力系数的损失越大,以等面型锯齿为例,在齿底角为 30° , 45° 和 60° 的情形下,推力系数相对于基准喷管的降低程度依次为 0.3%, 1.5% 和 2.8%.同时,3 种锯齿修型方式中,内缩型锯齿对推力系数的影响最弱,外伸型锯齿对推力系数的影响最大,以 60° 齿底角为例,内缩型、外伸型和等面型锯齿的推力系数相对于基准喷管的降低程度依次为 0.8%, 5% 和 2.8%.造成上述影响的原因在于,在齿宽不变的前提下,随着齿底角的增加,锯齿伸入排气主流的长度增加,导致主流与环境气流的掺混能力增强.相形之下,喷管出口修型对总压恢

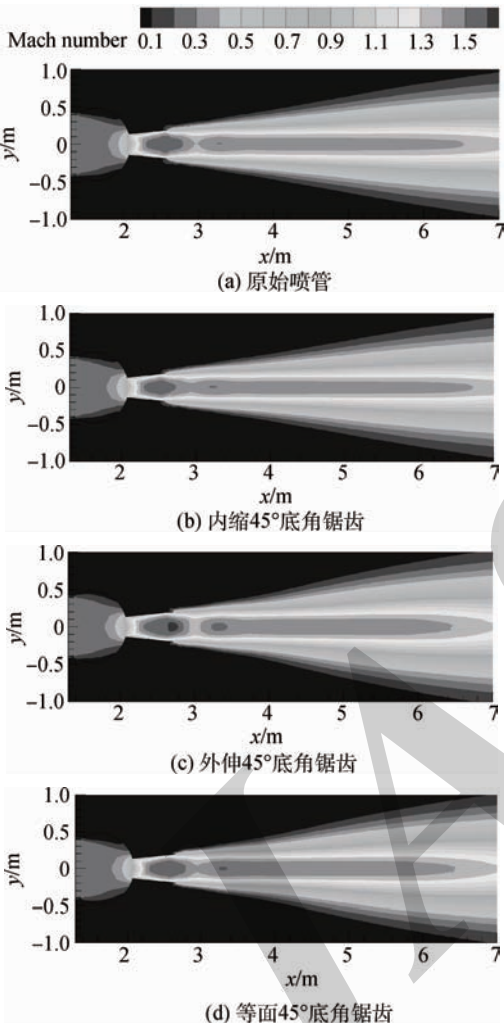


图 4 排气喷流马赫数分布

Fig. 4 Mach number distribution of exhaust plume

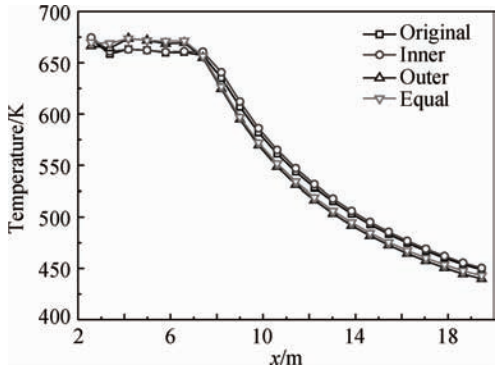


图 5 排气喷流中心线温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at central line of exhaust plume

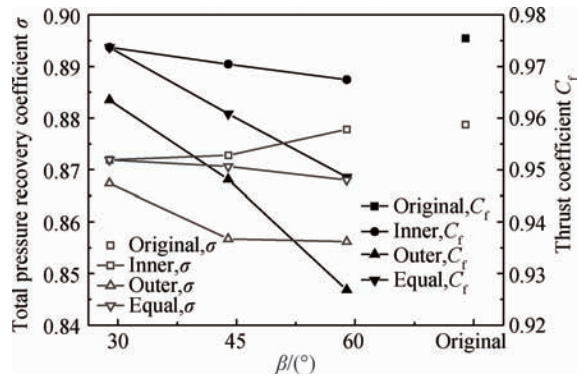


图 6 修型锯齿对排气系统气动性能的影响

Fig. 6 Influence of shaped chevrons on aerodynamic performances of exhaust system

复系数的影响则较为复杂,总体上,3 种锯齿修型方式均造成排气系统总压恢复系数的下降,外伸型锯齿对总压恢复系数的影响最大,但锯齿底角对不同锯齿修型方式的影响存在一定的差异.在本文所研究的等面型锯齿结构参数范围内,总压恢复系数的相对降低幅度在 1% 以内.

3.2 气体红外辐射特性对比

图 7 为内缩型、外伸型和等面型锯齿修型喷管与基准喷管在水平方向各个探测方向 3~5 μm 波段排气喷流红外辐射强度比值对比,图中 $I_{original}$

为基准喷管红外辐射强度, $I_{chevrons}$ 为锯齿修型喷管红外辐射强度.

从图 7(a) 可以看出,在尾向 $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}, 0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 测点范围内内缩型锯齿喷管气体红外强度与基准喷管相当,但随着测点角度的增大,内缩修型喷管气体辐射在 $-50^{\circ}\sim -15^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 探测范围内较基准喷管有 10%~50% 的增强,这是由于内缩型锯齿使得扩张段面积降低,减少了对喷管内部高温燃气的遮挡,高温燃气核心区可以被直接探测.由于齿底角的增加,内缩型修型方式对扩张段面积的减少影响更加显著,因此气体辐射在 $-50^{\circ}\sim -15^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 探测范围内辐射强度比值的峰值达到 1.46.

从图 7(b) 可以看出,外伸型锯齿修型喷管的气体辐射与基准喷管相比总体略有下降.在 $-20^{\circ}\sim 0^{\circ}, 0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 探测范围内气体红外辐射较基准喷管下降 5%.这是由于外伸锯齿增加了扩张段的有效长度,使得喷管出口下游核心区中的排气喷流温度有所衰减,此范围内气体辐射降低.由于锯齿底角的增加,外伸型修型方式对扩张段面积的增加影响更加显著,因此气体辐射在 $-20^{\circ}\sim 0^{\circ}, 0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 探测范围内辐射强度相对降低幅度有所增大.

图 7(c) 为等面型锯齿喷管气体红外辐射与基准喷管对比图,齿底角对气体红外辐射强度的影响相对内缩型或外伸型较为复杂, 30° 齿底角的锯齿对排气喷流红外辐射的抑制作用得到体现,在 $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}, 0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 探测范围内辐射强度相对降低幅度为 6% 左右.

3.3 总体红外辐射特性对比

图 8 为内缩型、外伸型和等面型锯齿修型喷管与基准喷管在水平方向各个探测方向 3~5 μm 波段总体红外辐射强度比值对比.总体红外辐射由内部高温部件、壁面以及气体辐射组成.

从图 8(a) 可以看出,内缩型锯齿修型造成其总体红外辐射强度较基准喷管在全方位探测点上均有不同程度的增强.在喷口正后向 $-5^{\circ}\sim 0^{\circ}, 0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 探测视角内,由于红外辐射的主要来源是喷管腔体内部的高温部件,喷口修型对该视角范围内的总体红外辐射基本没有影响;由于内缩型锯齿对基准喷管出口附近扩张段表面的部分切除,造成对喷管内部高温壁面的探测可视视场有所增大,导致在 $-15^{\circ}\sim -5^{\circ}$ 和 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 探测范围内的红外辐射强度显著增加,并且随着齿底角的增大而增强,在 $\pm 15^{\circ}$ 探测角下, 60° 齿底角的内缩型锯齿喷管的总体红外辐射强度接近基准喷管的

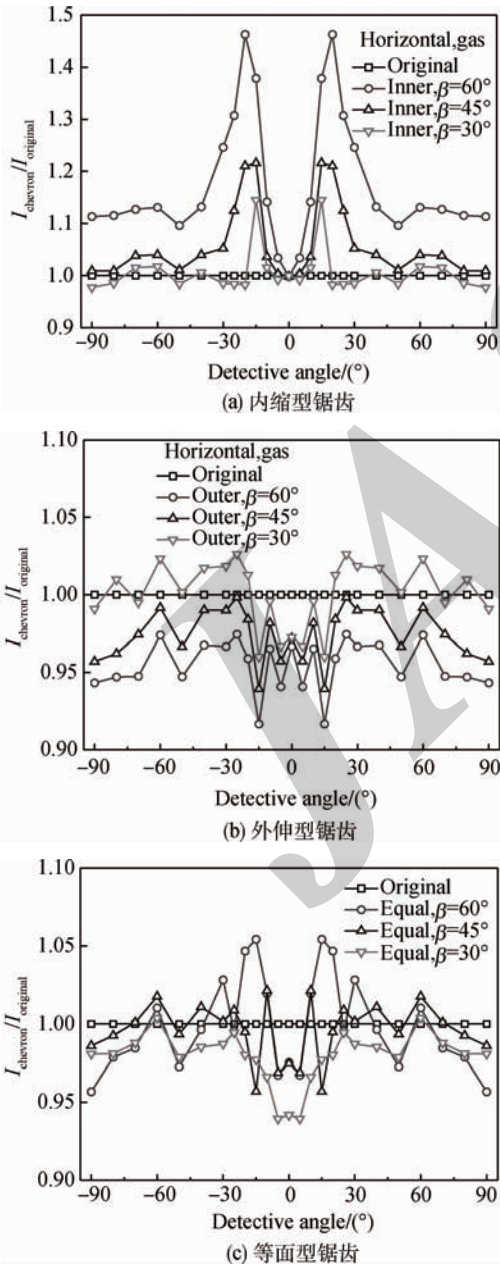


图 7 排气喷流 3~5 μm 波段红外辐射强度对比值
Fig. 7 Ratio of exhaust plume infrared radiation intensities in 3~5 μm band

1.4 倍;随着探测角度的继续增大,喷管扩张段成为红外辐射的主要构成,此时,内缩型锯齿一方面使得探测视场增加,另一方面,又使得扩张段的表面积有所减小,因此其红外辐射强度与基准喷管的相对比值随探测角度呈现波动的分布趋势.注意到,虽然在 $-90^{\circ}\sim-30^{\circ}$ 和 $30^{\circ}\sim90^{\circ}$ 探测范围内,红外辐射强度比值的波动幅度较大,但由于在该探测范围内基准喷管的红外辐射强度值很小,因此,内缩型锯齿修型喷管与基准喷管的红外辐射强度在数值上却非常接近.

从图 8(b)可以看出,外伸型锯齿喷管在喷口

正后向 $-5^{\circ}\sim0^{\circ}$, $0^{\circ}\sim5^{\circ}$ 探测视角内的红外辐射强度与基准喷管依然一致.与内缩型锯齿方式相比,外伸型锯齿喷管在 $\pm 15^{\circ}$ 探测角附近较基准喷管有 3%左右的降低.外伸型锯齿一方面可以有效遮挡对喷管腔体内部高温壁面的探测,但同时也使得扩张段表面积有所增大,这两者的作用效果在不同的探测角下所产生的影响不同,导致其红外辐射强度与基准喷管的相对比值随探测角度呈现波动的分布趋势,在 $\pm 20^{\circ}$ 探测角下,外伸型锯齿喷管的总体红外辐射强度大约是基准喷管的 1.05 倍.

从图 8(c)可以看出,等面型锯齿喷管在红外辐射强度值最大的尾向,体现出较好的红外辐射抑制作用,尤其是 30° 齿底角的结构,其红外辐射强度在 $-30^{\circ}\sim0^{\circ}$, $0^{\circ}\sim30^{\circ}$ 的探测视角内均低于基准喷管,最大相对下降幅度达到 5%.虽然在 $\pm 60^{\circ}$ 探测视角附近,其红外辐射强度大约是基准喷管的 1.1 倍,但大探测视角下基准喷管的红外辐射强度值低,两者在数值上基本接近.

4 结 论

- 1) 相对于基准喷管,3 种锯齿修型方式均造成排气系统推力系数和总压恢复系数的下降,且齿底角越大推力系数的损失越大.
- 2) 内缩型锯齿修型相对于基准喷管,对推力系数和总压恢复系数的影响微弱,但对排气喷流和总体的红外辐射不具有抑制作用,甚至导致在 $\pm 15^{\circ}$ 探测角附近红外辐射强度的较大增强.
- 3) 外伸型锯齿修型对排气系统推力系数和总压恢复系数的影响最大,其中 60° 齿底角在 $-20^{\circ}\sim0^{\circ}$, $0^{\circ}\sim20^{\circ}$ 探测角内气体红外辐射较基准喷管下降 5%左右,总体红外辐射在 $\pm 15^{\circ}$ 探测角附近有 3%左右的降低.
- 4) 等面型锯齿修型对推力系数和总压恢复系数的影响微弱,其中 30° 齿底角在 $-10^{\circ}\sim0^{\circ}$, $0^{\circ}\sim10^{\circ}$ 探测范围内气体红外辐射强度相对降低幅度为 6%左右,总体红外辐射强度在 $-30^{\circ}\sim0^{\circ}$, $0^{\circ}\sim30^{\circ}$ 的探测视角内均低于基准喷管,最大相对下降幅度达到 5%.

参考文献:

[1] GUTIERREZ J L. First full scale engine evaluation of an IHPTET exhaust nozzle technology demonstrator [R]. AIAA 95-2747, 1995.

[2] 梁春华,靳宝林,李雨桐.球形收敛调节片矢量喷管的发展[J].航空发动机,2002(3):55-58.

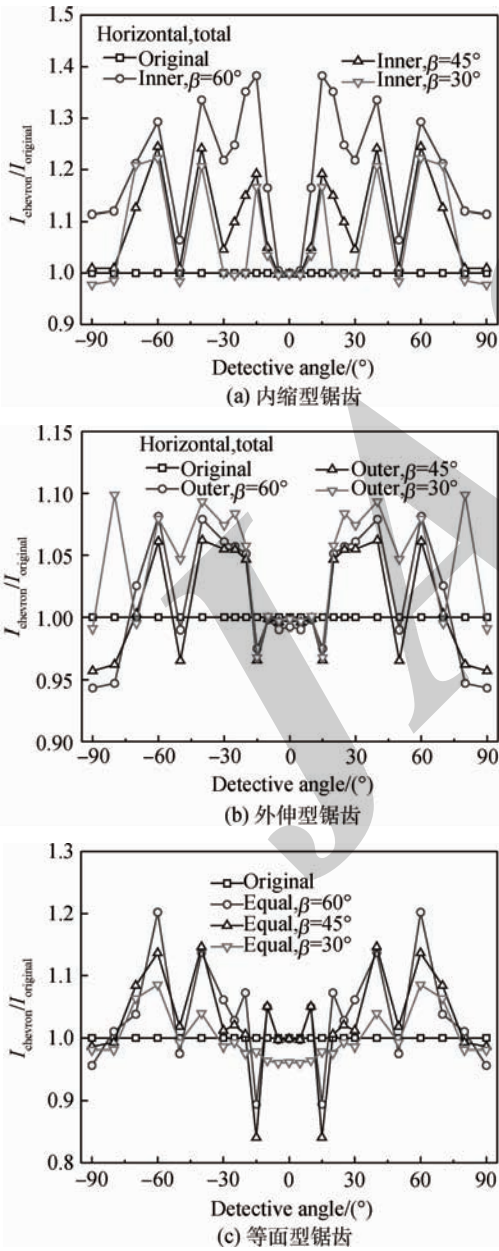


图 8 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段总体红外辐射强度对比值
Fig. 8 Ratio of total infrared radiation intensities in $3\sim 5\mu\text{m}$ band

- LIANG Chunhua, JIN Baolin, LI Yutong. Development of spherical convergent flap nozzle[J]. *Aeroengine*, 2002(3): 55-58. (in Chinese)
- [3] MEYER B E, MACLEAN M K. Scale model test results for several spherical/two-dimensional nozzle concepts[R]. AIAA 93-2430, 1993.
- [4] WING D J. Static thrust and vectoring performance of a spherical convergent flap nozzle with a nonrectangular divergent duct[R]. NASA TP-1998-206912, 1998.
- [5] 宋洁, 王强. 复杂形式球型收敛调节片喷管内流场计算及分析[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(8): 1325-1329.
- SONG Jie, WANG Qiang. Numerical investigation on internal flow of a spherical convergent flap nozzle with complex geometry[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(8): 1325-1329. (in Chinese)
- [6] 郑礼宝, 张靖周. 矢量二元收扩喷管热射流复杂流场特征研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2000, 14(2): 26-30, 48.
- ZHENG Libao, ZHANG Jingzhou. Investigation of hot-jet characteristics of 2-D C-D vectoring nozzle [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2000, 14(2): 26-30, 48. (in Chinese)
- [7] 王宏亮, 张靖周, 单勇. 球型收敛调节片喷管静态内性能数值研究[J]. *推进技术*, 2008, 29(4): 443-447.
- WANG Hongliang, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical study on static internal performance of spherical convergent flap nozzle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(4): 443-447. (in Chinese)
- [8] 王宏亮, 张靖周, 单勇. 球型收敛调节片喷管红外特性数值研究[J]. *航空学报*, 2009, 30(9): 1576-1582.
- WANG Hongliang, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical study on infrared radiation characteristics of spherical convergent flap nozzles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1576-1582. (in Chinese)
- [9] FOSS J K, ZAMAN K B M Q. Large- and small-scale vortical motion in a shear layer perturbed by tabs[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 382(2): 307-329.
- [10] ZAMAN K B M Q, BRIDGES J E, HUFF D L. Evolution from “tabs” to “chevron technology”: a review[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2011, 10(5/6): 685-710.
- [11] SAMIMY M, ZAMAN K B M Q, REEDER M F. Effect of tabs on the flow and noise field of an axisymmetric jet[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(4): 609-619.
- [12] BEHROUZI P, MCGUIRK J J. Effect of tab parameters on near-field jet plume development[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(3): 576-585.
- [13] BEHROUZI P, MCGUIRK J J. Effect of tabs on rectangular jet plume development[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(4): 930-939.
- [14] SHAN Y, ZHANG J Z, WANG Y M. Numerical investigation on aerodynamic and combustion performance of chevron mixer inside an afterburner[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(11): 111501. 1-111501. 8.
- [15] 黄勇, 郭志辉, 魏福清, 等. 小突片对热射流红外辐射的影响研究[J]. *推进技术*, 2001, 22(2): 122-125.
- HUANG Yong, GUO Zhihui, WEI Fuqing, et al. Effect of tabs fixed on a convergent nozzle to the infrared radiation of the exhausting hot jet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(2): 122-125. (in Chinese)
- [16] 黄勇, 郭志辉, 魏福清, 等. 收扩喷管加小突片对尾喷流红外辐射的影响[J]. *航空动力学报*, 2001, 16(1): 19-22.
- HUANG Yong, GUO Zhihui, WEI Fuqing, et al. Effect of tabs fixed on a convergent-divergent nozzle on infrared radiation of exhausting jet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(1): 19-22. (in Chinese)
- [17] 黄宏艳, 王强. V 形尾缘喷管流场与红外特性的数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(2): 158-161.
- HUANG Hongyan, WANG Qiang. Numerical simulation on flow field and infrared characteristics of chevron nozzles [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(2): 158-161. (in Chinese)
- [18] 潘丞雄, 张靖周, 邵万仁, 等. 齿冠形收敛喷管模型气动和红外辐射特性数值研究[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(7): 1518-1523.
- PAN Chengxiong, ZHANG Jingzhou, SHAO Wanren, et al. Numerical research on flow dynamics and infrared radiation characteristics for scaled chevron convergent nozzle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(7): 1518-1523. (in Chinese)
- [19] 李伟, 张勃, 吉洪湖, 等. 不同锯齿对二元喷管实际腔体红外辐射特征影响的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(8): 1810-1816.
- LI Wei, ZHANG Bo, JI Honghu, et al. Numerical simulation on infrared radiation characteristics of two-dimensional chevron nozzles considering engine components [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(8): 1810-1816. (in Chinese)
- [20] ZHANG Jingzhou, PAN Chengxiong, SHAN Yong. Progress in helicopter infrared signature suppression[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(2): 189-199.
- [21] PAN Chengxiong, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Modeling and analysis of helicopter thermal and infrared radiation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(5): 558-567.
- [22] 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.
- LIU Youhong, SHAO Wanren, ZHANG Jinxiu. Numerical simulation of flowfield and infrared characteristics of an aeroengine exhaust system and its plume[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(4): 591-597. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)