文章编号:1001-5078(2022)02-0234-06

·红外技术及应用·

锯齿矢量喷管气动和红外辐射特性研究

蒋建峰1,2,征建生3

(1. 苏州工业园区服务外包职业学院,江苏 苏州 215123;2. 南京邮电大学计算机学院,江苏 南京 210000;3. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部,江苏 无锡 225700)

摘 要:通过数值计算研究,分析了单锯齿喷管出口对涡扇发动机排气系统球面收敛二元喷管 气动及红外辐射特性的影响。在本文的研究参数范围内,研究结果表明:与基准喷管相比,锯 齿的使用均会引起推力系数下降,同时 90°齿顶角锯齿会引起更大推力系数降低;锯齿喷管出 口尾迹与基准喷管相比,速度核心区扩大引起速度衰减更为迅速。锯齿对主要水平方向喷管 中心向两侧 15°方向内尾迹红外辐射强度产生影响。无偏转的锯齿喷管在水平方向上总体红 外辐射与基准喷管强度接近,锯齿作用体现在喷管偏转时。20°矢量偏转时,水平方向 90°探 测角位置 60°顶角锯齿喷管下降 95 %,90°和 120°顶角则分别降低 25.6 % 和 12.3 %。 关键词:球面收敛二元喷管;锯齿修型;气动特性;红外辐射特性 中图分类号;TN219 文献标识码;A DOI;10.3969/j.issn.1001-5078.2022.02.014

Research on aerodynamic and infrared signature of vectoring nozzle with chevron

JIANG Jian-feng^{1,2}, ZHENG Jian-sheng³

(1. Suzhou Industrial Park Institute of Services Outsourcing, Suzhou 215123, China;
2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China;
3. Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi 225700, China)

Abstract: The influence of outlet with single-chevron on the aerodynamic and infrared performances of a spherical convergent two-dimensional nozzle used in turbofan engine exhaust system is analyzed by numerical calculation. Within the range of parameters presented in this study, the results show that; the use of single-chevron results in a reduction in thrust coefficients compared to the reference nozzle, and the 90° angle single-chevron will cause a greater thrust coefficient reduction. Compared with the reference nozzle, the speed attenuation caused by the expansion of the velocity core area of the single-chevron nozzle exit wake is more rapid. Single-chevron affects the infrared radiation intensity of the wake in the direction 15° from the center of the nozzle to both sides of the main horizontal direction. The overall infrared radiation of the non-deflection single-chevron nozzle in the horizontal direction is close to the intensity of the reference nozzle, and the single-chevron effect is reflected when the nozzle is deflected. At 20° vector deflection, the horizontal 90° detection angle position of the 60° top angle saw-tooth nozzle decreases by 95 %, and the 90° and 120° angles decrease by 25. 6 % and 12. 3 %, respectively.

Keywords: spherical convergent two-dimensional nozzle; shaped-chevron; aerodynamic characteristics; infrared radiation characteristics

基金项目:江苏省博士后研究基金项目(No. 2018K009B);江苏省专业带头人高端研修项目(No. 2020GRF074)资助。 作者简介:蒋建峰(1983 -),男,副教授,硕士,主要从事红外技术研究,数据分析与仿真。E-mail:jiangjf@ siso.edu.cn 收稿日期:2021-08-26

1 引 言

为了满足未来战斗机更加宽泛的性能要求^[1], 对能够同时实现战机俯仰与偏航控制的球面收敛二 元矢量喷管研究逐渐得到大家的关注^[2-3]。

目前国内外针对此类型喷管开展了一系列的研究。针对气动性能的研究,黄章斌和黄宏艳^[4-6]等 各自利用模型试验和数值模拟手段对球面收敛收扩 喷管进行了研究,考察了俯仰角、偏航角和喉道宽高 比等尺寸参数对性能的影响。

锯齿的加入主要为缩短喷流核心区的长度,同时 增大了对内部高温部件的遮挡,在喷管矢量偏转时可 以有效降低喷管的红外辐射特征,达到保护战机的目 的。针对锯齿或突片作用原理的研究逐渐的得到研究 人员的探索^[7-8]。杨智惠等试验研究了突片对喷管气 动和红外辐射抑制效果,结果表明突片会造成推理系 数下降,后向红外辐射强度有效降低 10 % ~ 20 %。

本文针对全尺寸单锯齿排气系统进行数值仿 真,分析喷管红外特性、气动性能分别受喷管尾部锯 齿结构及喷管俯仰动作的影响规律。

2 物理模型

本文研究的排气系统主要包含内外涵道、涵道 混合器、中心锥体、火焰稳定器、球面收敛段和二元 扩张段如图1所示。



1-内涵;2-外涵;3-混合器;4-中心锥; 5-火焰稳定器;6-球面收敛段;7-喷管扩张段 图1 排气系统示意图 Fig.1 Schematic of nozzle

模型总长度约为2.5 m,宽(W)高(H)比为2, 如图2(a)所示。图2(a)为本文研究的基准喷管, 在喷管出口分别采用不同齿顶角,分别为60°、90° 和120°。锯齿底边与出口宽度一致,采用等腰三角 形形状,改变锯齿的顶角β。

3 数值计算方法

3.1 网格划分与边界条件

网格划分采用 ANSYS – ICEM 软件。整体采用 非结构化网格以应对排气系统内部复杂型面。为对 计算模型进行网格独立性测试,通过改变排气系统 壁面附近网格的疏密和尾迹外场的网格尺寸,划分 计算域网格数目分别为 200 万,3500 万,513 万,602 万和 816 万。对比计算结果和计算时间,选定计算 网格数目为 602 万。



进口边界条件采用质量流量进口,其中外涵入口流量为50 kg/s,总温为400 K,内涵入口燃气流量 设为80 kg/s,总温为1100 K。为了进行喷管红外辐 射计算,在进行流场仿真时考虑流体组分,其中外涵 为标准大气,内涵为燃烧后的燃气,成分仅考虑二氧 化碳和水蒸气,质量占比分别为0.233 和0.767。 外场边界为压力出口,环境压力101325 Pa 和环境 温度300 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,壁面的 发射率设为0.75^[9]。

采用标准 *k* - ε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二 阶迎风差分格式离散,各变量的收敛精度均设为 10⁻⁶,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法^[10]。

3.2 红外辐射特性计算

本文采用正反射线踪迹法计算排气喷流和喷管 内部的3~5 µm 波段红外辐射,详细计算方法参考文 献[11]。在喷管出口中心线所在的水平面和垂直面 上分别取距离喷管出口中心的探测点,探测距离设为 60 m。出口中心线为0°位置,探测点具体分布详见图 3。大气对红外辐射特性的影响本次计算暂未考虑。



4.1 气动特性

图4为喷管出口下游热喷流的马赫数分布。 60°顶角锯齿结构延长了喷管扩张段的长度,增加了 扩张段面积,尾流由于锯齿的存在,射流张角增大。 锯齿的存在使得喷管热喷流可以在锯齿部分继续膨 胀,但是因为进口条件没有改变,没有足够的压力使 得速度继续增加,在出口处存在一道激波用来使流 体速度升高。

90°顶角和120°锯齿扩张段长度同样被加长, 但是面积比60°锯齿降低。热喷流也会在锯齿中继 续膨胀,由于面积减小,所需要的膨胀压力降低,这 道激波造成的损失减小。90°锯齿低压区域分布面 积减小,正激波位置在锯齿外,且激波强度降低,高 压分布区域面积降低。随着喷管偏转角度的增大, 低压区的范围逐渐降低。

比较喷管出口下游马赫数的衰减速度可以发现 随着齿顶角的增大,衰减速度逐渐降低,这是由于尾 喷流的膨胀程度逐渐降低,动能衰退速度变慢导致。

对于排气系统而言,推力系数是反应矢量喷管 排气系统气动性能的主要参数之一。针对考虑内、 外涵进气的排气系统,其定义如下:

喷管推力系数 C_v:

$$C_v = F/F_i \tag{1}$$

)

式中,F是喷管实际推力;F_i是通过一维等熵公式计 算出的理论推力。



图4 热喷流马赫数分布

Fig. 4 Mach number distribution of exhaust plume

图 5 为各类型锯齿喷管在不同俯仰角下推力系 数变化图。可以看出,加装了锯齿结构喷管后推力 系数比常规喷管小。这是由于增加了锯齿结构,尾 喷流掺混能力加强,喷管的推力系数有一定程度的 降低。推力系数随着顶角的增大先减小后增大。随 着下俯矢量角的增加,推力系数均有所下降,但是齿 顶角 90°喷管对推力系数的影响较大。





4.2 气体红外辐射特性对比

图 6 为不同俯仰角时锯齿修型喷管和基准喷管 在水平方向热喷流各个探测方向 3 ~ 5 μm 波段热 喷流红外辐射强度与基准喷管热喷流红外辐射强度 峰值的比值(*I*_c)。





从图 6 中可以看出无偏转时水平方向在热喷流 红外辐射空间分布呈现明显的双峰形状,这是由于 气体的辐射和吸收在整个气体容积中进行的,在中间90°位置,虽然燃气辐射大,但同时气体的吸收也大,因而被探测到得值较低。在处于对称位置的80°与100°的测点处可以探测到最高的热喷流辐射。无偏转时可以看出锯齿对热喷流的影响较小。随着矢量偏转时,双峰结构逐渐减弱。偏转20°时,60°顶角锯齿喷管热喷流辐射形状与其他锯齿不同,这是由于锯齿面积过大而遮挡了部分尾流核心区辐射。与原始喷管相比,90°探测点探测的数值差距随着偏转矢量角的增大而加大,从无偏转时的3.7%到20°偏转时的41.5%。总体来看,锯齿对热喷流的影响效果随顶角的增大而减弱。

从图 6(c) 中可以看出原始喷管在发生矢量偏转时,"双峰"结构逐渐消失,这意味着 90°测点处气体容积辐射效果减弱,测点逐渐远离气体温度核心区。20°矢量偏转后 90°测点位置数值降 20.2%。 而加装锯齿结构喷管随着偏转矢量角度的增加,也同样保持的这样的规律,但推迟了双峰结构的消失。 20°矢量偏转后 90°位置探测到的辐射强度下降 34.2%。

4.3 总体红外辐射特性对比

图 7 为不同俯仰角下喷管在水平方向各个探测 方向 3 ~ 5μm 波段总体红外辐射强度与基准喷管总 体红外辐射强度峰值的比值(*I*,)。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 7(a)中可以看出锯齿的增加在无偏转矢 量角时,锯齿喷管与原始喷管无明显差别。在喷管 发生矢量偏转时,锯齿喷管高温部件辐射降低,且随 着顶角的增大辐射值也增大。这是因为锯齿温度比 喷管内部温度低很多,主要起到遮挡高温部件的作 用。因而从图中可以明显看出来,随着偏转矢量角 的增加不同锯齿的差别逐渐显现。锯齿顶角越小, 锯齿面积越大,遮挡的高温部件范围也越多,因而被 探测到得数值也越低,20°矢量偏转时,60°顶角锯齿 数值突降。锯齿内部高温部件遮挡住,内部的高温 部件时辐射的主要来源,90°测点位置下降 95 %,效 果显著,90°和 120°顶角则分别降低 25.6 % 和 12.3 %。

随着喷管作矢量偏转时,高温部件红外辐射强 度逐渐减弱,且随着偏转矢量角的增大而降低。原 始喷管在10°矢量角和20°矢量角偏转时,峰值分别 下降 30.3 % 和 69.9 %。90°顶角锯齿喷管则分别 下降 77.7 % 和 36.6 %。可见锯齿喷管在矢量偏转 时对高温部件辐射偏转时效果更好。



Fig. 7 Ratio of total infrared intensities in $3\sim 5~\mu m$ band

5 结 论

(1)与基准喷管相比,锯齿的使用均会引起推 力系数下降,同时 90°齿顶角对喷管推力系数的影 响要大于另外两组齿顶角锯齿喷管。 (2)单锯齿喷管出口尾迹与基准喷管相比,速 度核心区有所扩大,但是速度衰减更为快速。

(3)锯齿对水平方向喷管中心向两侧 15°方向 内尾迹红外辐射强度有一定的影响,其余水平方向 影响甚微。

(4)无偏转的锯齿喷管在水平方向上总体红外 辐射与基准喷管强度接近,锯齿作用体现在喷管偏 转时。20°矢量偏转时,水平方向90°探测角位置 60°顶角锯齿喷管下降95%,90°和120°顶角则分别 降低25.6%和12.3%。

参考文献:

Li Liguo, Zhang Jingzhou. Ejector mixer for aviation [M].
 Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

李立国,张靖周. 航空用引射混合器[M]. 北京:国防 工业出版社,2007.

[2] Song Jie, Wang Qiang. Calculation and analysis of the flow field in the nozzle with complicated spherical convergence regulating vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (8):1325-1329. (in Chinese)

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.

[3] Zuo Xiujuan, Huang Yong, Li Yong, et al. PIV measurement of nozzle with small tabs to enhance jet mixing[J].
 Journal of Propulsion Technology, 2004, (1):15 - 18. (in Chinese)

左秀娟,黄勇,李永,袁辉靖.喷管加装小突片强化射 流混合的 PIV 测量[J].推进技术,2004,(1):15-18.

[4] Huang Zhangbin, Guan Liu, Li Xiaoxia. Influence of nozzle type on radiation characteristics of aircraft exhaust system[J]. Infrared Technology, 2021, 43 (6):5. (in Chinese)

黄章斌,管留,李晓霞,等.喷管类型对飞行器排气系 统辐射特性的影响[J].红外技术,2021,43(6):5.

[5] Huang Zhangbin, Li Xiaoxia, Feng Yunsong. Infrared radiation characteristics of binary rectangular nozzle exhaust system
 [J]. Laser & Infrared, 2017, 47 (4): 460 - 464. (in Chinese)

黄章斌,李晓霞,冯云松,等. 二元矩形喷管排气系统 红外辐射特性[J]. 激光与红外,2017,47(4): 460-464.

[6] Huang Hongyan, Wang Qiang. Numerical simulation of

flow field and infrared characteristics of V-shaped trailing edge nozzle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, (2):158 - 161. (in Chinese)

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,(2): 158-161.

[7] Cui Li, Zhang Bo, Li Jiquan. The effect of the round-to-rectangular convergent section on the nozzle flow and infrared radiation characteristics [J]. Infrared Technology, 2019,41(12):80-87. (in Chinese)

崔力,张勃,李基权,等.圆转矩形收敛段型面对喷管 流动与红外辐射特性影响[J].红外技术,2019,41 (12):80-87.

[8] Yang Zhihui, Han Yuge, Ren Dengfeng. Numerical study on infrared radiation characteristics of lobe nozzle infrared suppressor[J]. Infrared Technology, 2017, (7):. (in Chinese)

杨智惠,韩玉阁,任登凤.波瓣喷管红外抑制器红外辐射特性的数值研究[J].红外技术,2017,39(7):6.

- [9] Zheng Jiansheng, Zhang Jingzhou, Shan Yong, et al. The influence of the triangular serration of the spherical convergent binary nozzle outlet on the aerodynamic and infrared characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6):1328-1334. (in Chinese)
 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.
- [10] Ji Jingyuan, Zhang Jingzhou, Shan Yong, et al. Research on aerodynamic and infrared characteristics of spherical convergence binary vector nozzle: simulating ground state
 [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32 (3):614 – 620. (in Chinese)

季靖远,张靖周,单勇,等.球面收敛二元矢量喷管气动及红外特性研究:模拟地面状态[J].航空动力学报,2017,32(3):614-620.

[11] Zhang J, Pan C, Shan Y. Progress in helicopter infrared signature suppression [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, (2):189-199.