

文章编号:1000-8055(2013)11-2468-07

双 S 弯喷管流动特性及红外辐射特性分析

章叶川¹, 王占学¹, 史经纬¹, 方立², 孔德英²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘 要: 基于分区控制技术, 发展了型面易控的双 S 弯喷管型面设计方法, 用 CFD 数值模拟技术, 对双 S 弯喷管的流动特性进行了数值模拟. 采用信息通道界面(MPI)并行算法编写了基于离散传递法的红外辐射特性计算程序, 对双 S 弯喷管红外辐射特性进行了计算, 并与具有相同进出口面积的轴对称收缩喷管的红外辐射特性进行了对比. 研究表明: 双 S 弯喷管宽边探测面红外辐射强度低于窄边探测面红外辐射强度, 最大幅度为 80%; 与轴对称收缩喷管相比, 双 S 弯喷管红外辐射强度明显降低, 尤其在宽边探测面的 30°~40°探测方向上, 比轴对称收缩喷管的红外辐射强度低大约 30%.

关键词: 双 S 弯喷管; 流动特性; 离散传递法; 红外辐射; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Analysis on flow and infrared radiation characteristics of double S-nozzle

ZHANG Ye-chuan¹, WANG Zhan-xue¹, SHI Jing-wei¹,
FANG Li², KONG De-ying²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. The First Aircraft Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on partition control technology and CFD numerical simulation, the easily controllable design methods of double S-nozzle type surface were developed, and the flow characteristics of double S-nozzle were simulated. With message passing interface (MPI) parallel algorithm and discrete transfer method, the software of infrared radiation characteristics was programmed. The infrared radiation characteristics of double S-nozzle were computed by the software. The infrared radiation characteristics were compared with those of axisymmetric convergent nozzle with the same inlet and outlet areas. The results show that the infrared radiation intensity of wide detection surface of double S-nozzle is less than that of the narrow detection surface, with the biggest margin up to 80%. The infrared radiation intensity on each probing direction is lower than that of axisymmetric convergent nozzle, especially on the probing direction between 30° and 40° in the wide detection surfaces, and the infrared radiation intensity of double S-nozzle is lower 30% than that of axisymmetric convergent nozzle.

收稿日期: 2012-11-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51176156); 教育部博士点基金(20106102110025)

作者简介: 章叶川(1988-), 男, 安徽桐城人, 硕士生, 主要从事航空发动机排气系统研究.

Key words: double S-nozzle; flow characteristics; discrete transfer method; infrared radiation; numerical simulation

随着红外制导技术的快速发展,红外隐身技术越来越受到重视.研究开发具有低可探测性的排气系统是实现飞机降低红外辐射强度的重要措施.双 S 弯喷管以其良好的气流掺混特性、对高温部件的遮挡性等特点成为最具前景的降低红外辐射强度的备选方案之一.

国外对双 S 弯喷管的研究起步较早,并且技术已相对成熟,已成功应用于 F-117, B2 等隐形战机上.国内关于双 S 弯喷管的研究仍处于探索阶段,目前主要是对单 S 弯喷管的红外辐射特性进行了研究,如单边膨胀 S 弯喷管红外辐射特性^[1-4].本文主要针对具有更好遮挡性能的双 S 弯喷管进行研究,通过流场数值计算研究双 S 弯喷管的流场及固体壁面温度场分布,同时,利用自行编写的红外辐射计算程序计算其红外辐射特征,并与相同进口面积的轴对称收缩喷管的红外辐射特征进行对比.

1 数值模拟

1.1 几何模型

目前可见文献中,双 S 弯喷管的型面设计方法基本上是由双 S 弯进气道的设计方法类比而来,型面控制主要依据 Lee^[5]提出的中心线与面积变化规律(其中中心线变化规律决定双 S 弯通道内的横向压力梯度,双 S 弯通道面积变化规律决定气流流向压比),但是此方法不利于双 S 弯喷管型面特性参数优化.针对此缺点本文采用型面分区控制法,分成 4 个区分别生成母线,如图 1(a),同时根据中心线 2 阶导数的变化规律控制中心线变化规律,三维模型如图 1(b).

1.2 控制方程、湍流模型及计算网格

流场计算基于求解三维 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程,时间推进求解采用 4 阶龙格-库塔法进行,对流项采用迎风格式离散求解,黏性项采用中心差分格式,湍流模型用经过 renormalization group(RNG)理论修正的 $k-\epsilon$ 模型.

红外辐射特性计算采用基于 MPI^[6]并行算法编写的红外辐射特性计算程序.利用流场计算得到的燃气组分摩尔分数分布、燃气温度分布以及壁面温度分布结果作为红外辐射计算的初值,通过离散传递法,分别计算燃气亮度以及壁面外

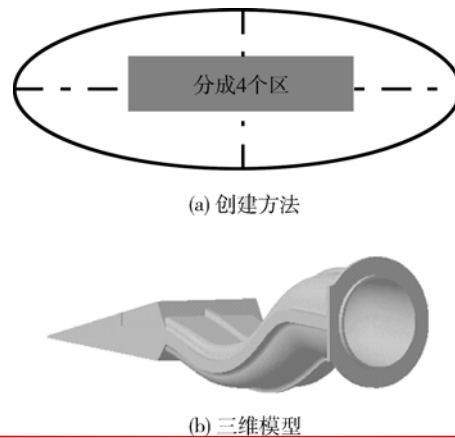


图 1 双 S 弯喷管的创建方法和三维模型
Fig. 1 Creating method and 3-D model of double S-nozzle

辐射和燃气红外辐射在不同探测点的总红外辐射强度^[7-15].

流场计算采用了分区生成的结构化网格,对喷管壁面处进行了网格加密,如图 2 和图 3.为提高红外辐射特性计算速度,对红外辐射特性计算采用的网格做了如下处理:计算程序自动地在燃气射流域选取温度或收发介质组分摩尔分数明显高于环境值的燃气流区域作为计算域;通过插值的方式稀化计算网格,进而大幅度地加快计算速度.



图 2 双 S 弯喷管计算网格
Fig. 2 Computational grid of double S-nozzle

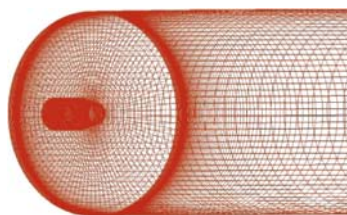


图 3 轴对称收缩喷管计算网格
Fig. 3 Computational grid of axisymmetric convergent nozzle

2 双S弯喷管流动特性分析

喷管进口与外流流场压力进口边界的总压分别为 280, 101.502 kPa, 进口总温分别为 900, 300 K, 进口 CO_2 , H_2O 的质量分数分别为 0.07708 和 0.03009, 计算远场边界压力为 101.325 kPa, 计算区域出口设定为压力出口边界, 静压为 101.325 kPa, 总温为 300 K.

双S弯喷管内部流动特性如图 4(a). 图中分别给出了对称面上的压力分布、不同轴向横截面上的马赫数云图以及流线分布. 从轴对称面的流场图可以看出, 在 3 个流动转向处, 均未出现流动分离, 流过弯管的离心作用使得内外壁面存在

8%~13.7% 相对压差. 从横截面的流线可以看出在 3 个管道转弯处由于内外壁面压差的存在使得流线发生弯曲, 但没有明显的二次流产生, 而从尾部两个横截面的流线拓扑结构可以看出流动产生了涡结构并且关于中心面对称, 流线的汇聚线是一条从鞍点至焦点的流线, 并且沿着轴线方向, 焦点位置上移.

图 4(b) 为双S弯喷管对称面上的静温分布图, 从图中可以看出, 高温区主要集中在双S弯喷管内部, 随着射流向下游运动, 掺混剧烈, 温度降低更加明显. 图 4(c) 和图 4(d) 分别为 CO_2 和 H_2O 的摩尔分数分布图. 从图中可以看出, 温度越高的区域, 这些组分的摩尔分数越大.

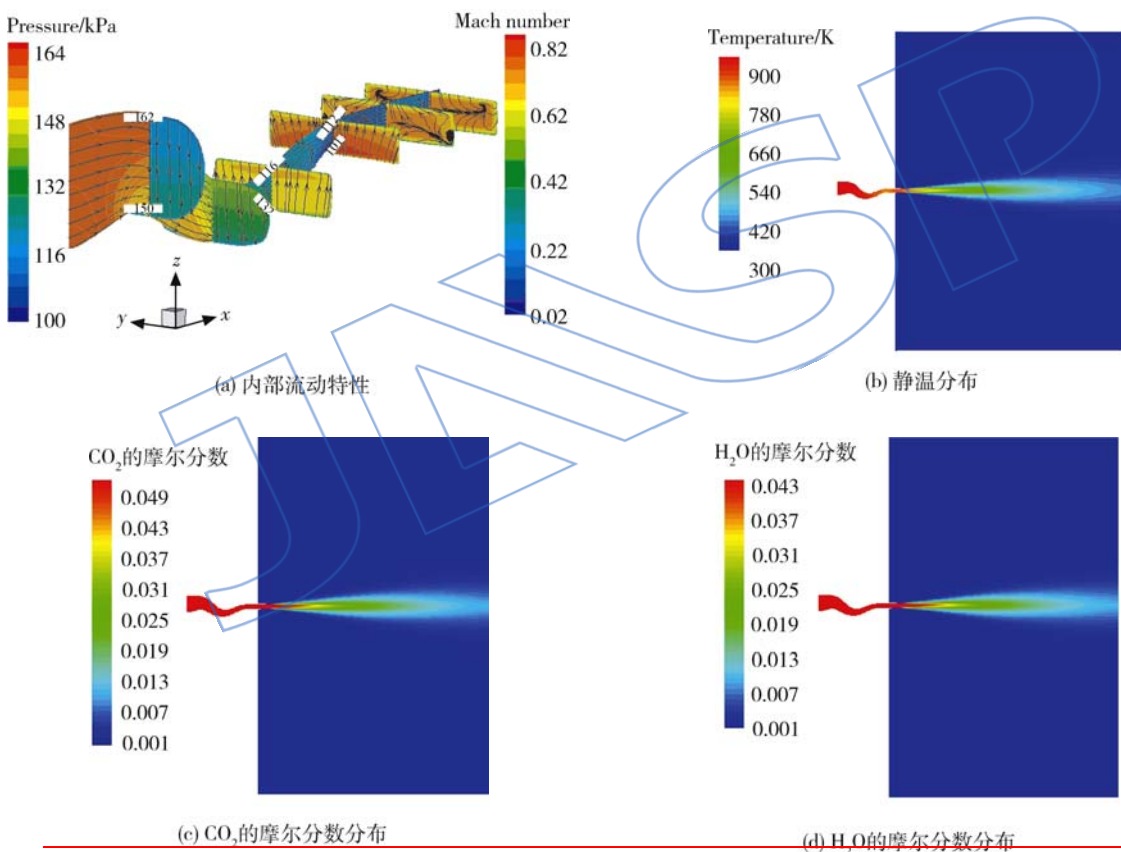


图 4 双S弯喷管的特性分布

Fig. 4 Characteristics distribution of double S-nozzle

3 红外辐射计算结果分析

3.1 红外辐射计算边界条件

本文设置固体壁面发射率为 0.85, 喷管进口面按壁面处理, 计算谱带为 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$, 谱带间隔为 $0.05 \mu\text{m}$, 探测点设置在距离喷管出口 100 m 处.

3.2 双S弯喷管光谱辐射强度分布

图 5 给出了双S弯喷管两个探测面的位置.

在几个典型方向上的双S弯喷管光谱辐射强度分布如图 6, 图中实线为宽边探测面光谱辐射强度, 虚线为窄边探测面光谱辐射强度, 横坐标为波长, 单位为 μm , 纵坐标为光谱辐射强度, 单位为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$. 各探测面双S弯喷管的光谱辐

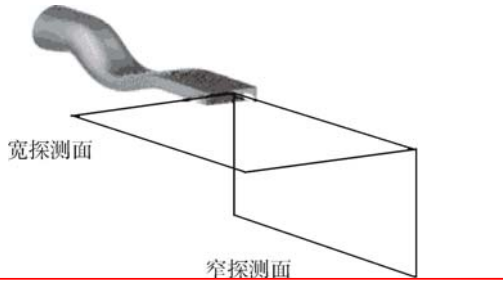


图 5 双 S 弯喷管的探测面示意图

Fig. 5 Diagram of double S-nozzle detection surfaces

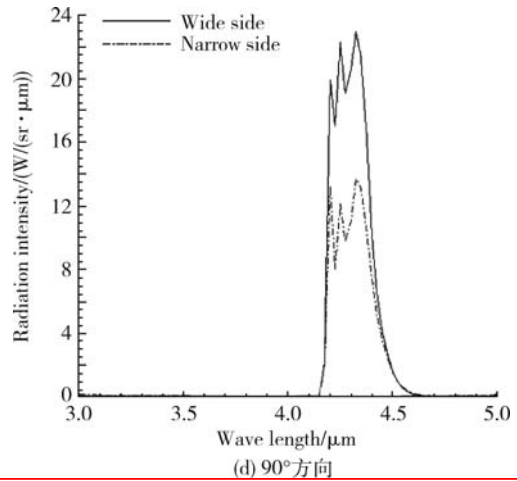
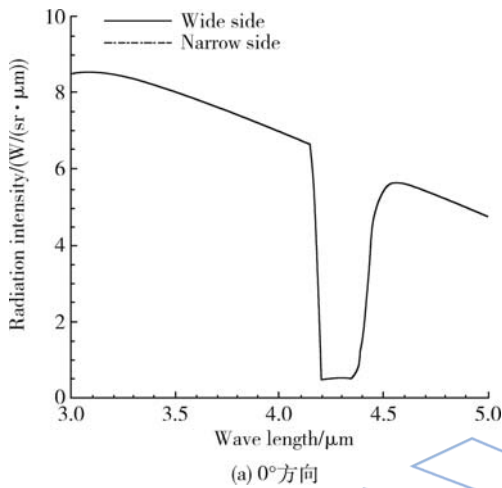
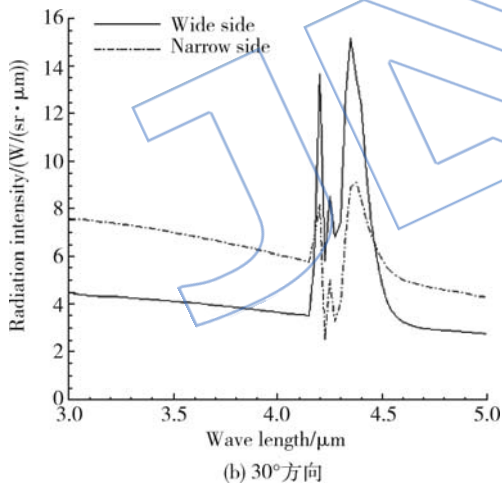


图 6 双 S 弯喷管光谱辐射强度分布

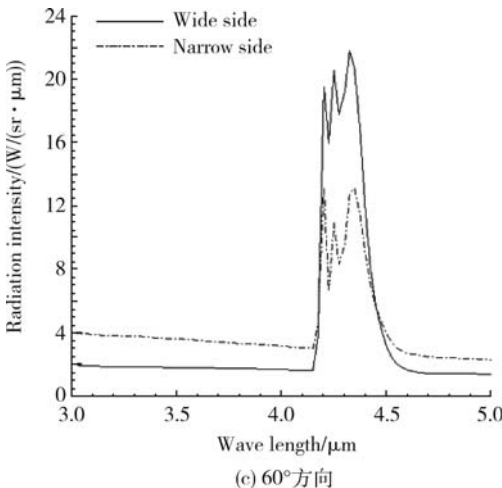
Fig. 6 Spectral radiation intensity distribution of double S-nozzle



(a) 0°方向



(b) 30°方向



(c) 60°方向

射强度分布具有如下特征:3.0~3.5 μm 波段内的光谱辐射强度呈下降趋势,辐射主要来源于固体壁面,但是在 0°方向 3.0~3.1 μm 附近光谱辐射亮度有所增加,是因为在固体壁面辐射很强的 0°方向上穿过的燃气路程很长, H₂O 吸收红外辐射的作用很明显,而在固体壁面辐射不是很强的方向上, H₂O 的吸收作用与增强作用并存,这也是其他探测方向上光谱辐射强度都是递减的原因. 3.5~4.12 μm 波段,光谱辐射强度为一条下降的光滑曲线,这是因为固体壁面辐射随着波长降低,而燃气中 H₂O 和 CO₂ 在该波段吸收系数都很低. 4.12~4.6 μm 波段内,在 0°~30°探测方向上光谱辐射强度分布出现两个明显的波峰和一个波谷,主要是由于此波段内 CO₂ 具有十分强烈的吸收和发射作用.而在 60°~90°探测方向上,温度降低程度小于 CO₂ 摩尔分数的降低程度,使燃气发射红外辐射强度很大,也就导致了波谷不断升高.在 4.6~5.0 μm 波段内,由于燃气中 H₂O 吸收作用明显增强、壁面的辐射呈下降趋势,导致光谱辐射强度随着波长的增加而下降.

各探测点接收的双 S 弯喷管燃气红外辐射强度见图 7,宽边探测面上燃气的红外辐射强度远大于窄边探测面上燃气的红外辐射强度.宽边探测面和窄边探测面上各探测点的燃气红外辐射强度随着探测角度的增加而增大.这是因为尾喷流为矩形羽流,则燃气在宽边探测面对探测点的投影面积大于其在窄边探测面对探测点的投影面积,壁面对于探测点的投影面积随着探测角度增大而减小.

各探测点接收的双 S 弯喷管壁面红外辐射强

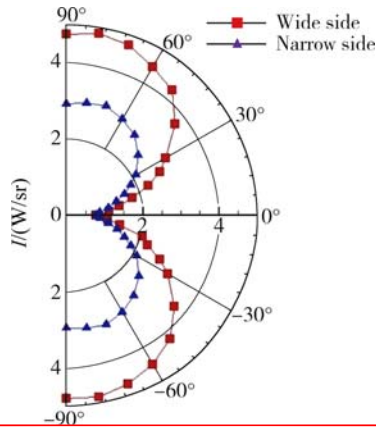


图 7 双 S 弯喷管燃气红外辐射强度
Fig. 7 Gas infrared radiation intensity of double S-nozzle

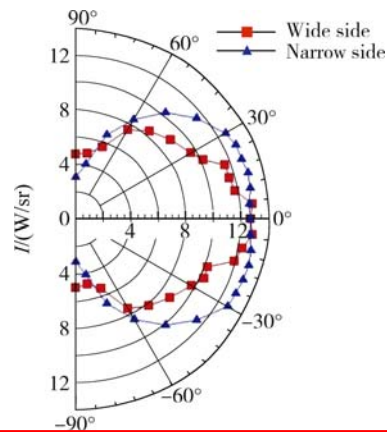


图 9 双 S 弯喷管总红外辐射强度
Fig. 9 Total infrared radiation intensity of double S-nozzle

度见图 8,在宽边探测面,随着探测角度的增加,探测点接收的来自于固体壁面的红外辐射强度迅速减小,这是因为壁面对于探测点的投影面积随着探测角度增大迅速减小;在窄边探测面,随着探测角度的增加,探测点接收的来自于固体壁面的红外辐射强度缓慢减小,这是因为随着探测角度增大,壁面对于探测点的投影面积减小幅度不大.

面上探测点接收的总红外辐射强度大于宽边探测面,这是因为窄边探测面上的探测点接收的来自于壁面的红外辐射强度大于宽边探测面上. 在 70°~90°探测方向上,宽边探测面的探测点接收的红外辐射强度大于窄边探测面,这是因为宽边探测面上的探测点接收的来自于燃气的红外辐射强度大于窄边探测面上.

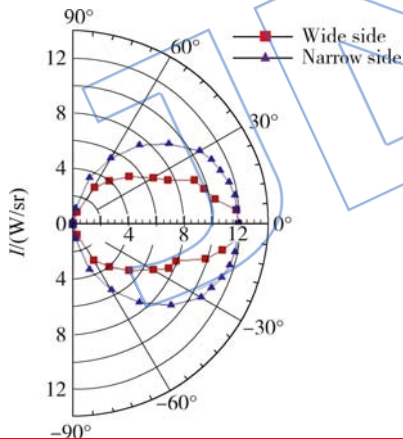


图 8 双 S 弯喷管壁面红外辐射强度
Fig. 8 Wall infrared radiation intensity of double S-nozzle

3.3 双 S 弯喷管与轴对称收缩喷管红外特性对比

图 10 给出了各探测方向上轴对称收缩喷管和双 S 弯喷管的燃气红外辐射强度分布. 在 0°~30°探测方向上,双 S 弯喷管宽边探测面的探测点接收的燃气红外辐射强度和轴对称收缩喷管的燃气红外辐射强度基本相等,双 S 弯喷管窄边探测面接收到的燃气红外辐射强度最小. 在 30°~90°探测方向上,双 S 弯喷管宽边探测面的探测点接

各探测点接收的双 S 弯喷管总红外辐射强度见图 9. 在宽边探测面内,总红外辐射强度随着探测角度增大逐渐减小,这是由于在宽边探测面,随着探测角度增大,投影面积减小很快,而且内部的高温壁面都被遮挡;而在窄边探测面内,总红外辐射强度随着探测角度增加先增大后减小,这是因为在窄边探测面,随着探测角度增大,投影面积减小缓慢,而且内部的高温壁面在相当大的探测角度下仍然可见. 在 0°~70°探测方向上,窄边探测

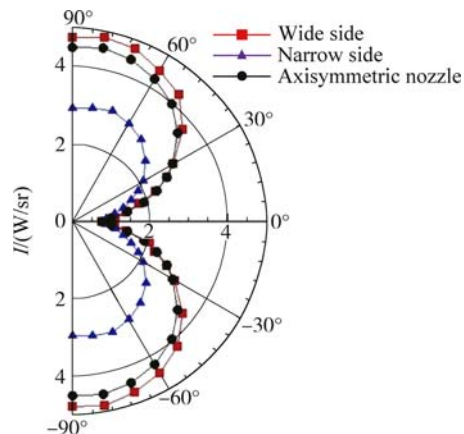


图 10 两种喷管燃气红外辐射强度
Fig. 10 Gas infrared radiation intensity of two nozzles

收的燃气红外辐射强度最大,其次为轴对称收缩喷管,最小的是双 S 弯喷管窄边探测面. 图 11 为轴对称收缩喷管和双 S 弯喷管的壁面红外辐射强度,从图中可以看出,轴对称收缩喷管的探测点接收的壁面红外辐射强度最大,其次为双 S 弯喷管窄边探测面,最小的是双 S 弯喷管宽边探测面.

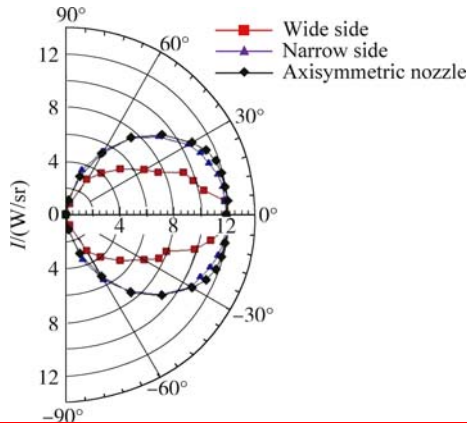


图 11 两种喷管壁面红外辐射强度
Fig. 11 Wall infrared radiation intensity of two nozzles

图 12 为轴对称收缩喷管和双 S 弯喷管的总红外辐射强度. 从图中可以看出,总体上,轴对称收缩喷管的探测点接收的总红外辐射强度最大,其次为双 S 弯喷管窄边探测面,最小的是双 S 弯喷管宽边探测面.

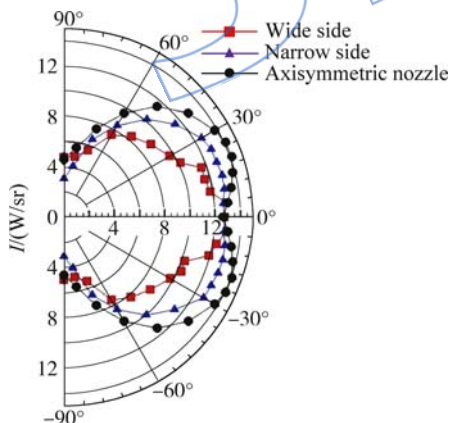


图 12 两种喷管总红外辐射强度
Fig. 12 Total infrared radiation intensity of two nozzles

表 1 为双 S 弯喷管两个探测面上的总红外辐射强度与轴对称收缩喷管的探测面上的总红外辐射强度的比值. 从表中可以看出,双 S 弯喷管的总红外辐射强度在几乎所有探测方向上都小于轴

对称收缩喷管,尤其在宽边探测面的 $30^\circ \sim 40^\circ$ 探测方向上,双 S 弯喷管的总红外辐射强度比轴对称收缩喷管的总红外辐射强度低大约 30%,只有在 0° 和 90° 探测方向上,双 S 弯喷管在宽边探测面上的总红外辐射强度略大于轴对称收缩喷管. 上述结果表明:在红外辐射特性方面,在大多数探测方向上,双 S 弯喷管明显优于轴对称收缩喷管. 计算程序得到的光谱辐射强度和红外辐射强度同理论分析一致.

表 1 双 S 弯喷管总红外辐射强度与轴对称收缩喷管总红外辐射强度的比值

Table 1 Ratio of total infrared radiation intensity of double S-nozzle to axisymmetric convergent nozzle

探测方向角/ ($^\circ$)	双 S 弯喷管宽边 探测面	双 S 弯喷管窄边 探测面
0	1.010	1.010
5	0.990	0.972
10	0.877	0.961
15	0.832	0.937
20	0.817	0.908
25	0.723	0.907
30	0.704	0.916
40	0.697	0.894
50	0.718	0.884
60	0.793	0.882
70	0.724	0.880
80	0.865	0.725
90	1.040	0.669

4 结 论

本文应用数值模拟技术对双 S 弯喷管的流场特性进行了数值模拟,用自编红外辐射计算程序,结合流场特性数据进行了红外辐射特性计算,研究表明:

- 1) 双 S 弯喷管的宽边探测面的红外辐射强度远低于窄边探测面,最大幅度达到 80%.
- 2) 在双 S 弯喷管的宽边探测面内,红外辐射强度随着探测角度增大逐渐减小;在其窄边探测面内,红外辐射强度随着探测角度增加先增大后减小.
- 3) 双 S 弯喷管与相同进出口面积的轴对称收缩喷管相比,在大多数探测方向上,双 S 弯喷管

的红外辐射强度均低于轴对称收缩管,尤其在宽边探测面的 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 探测方向上,双S弯喷管的红外辐射强度比轴对称收缩喷管的红外辐射强度低约30%。

参考文献:

- [1] 刘永昌,朱虹. 红外寻的制导的发展现状与新趋势[J]. 红外技术,1999,21(4):7-12.
LIU Yongchang, ZHU Hong. The development and new trend of IR seeking guidance techniques[J]. Infrared Technology, 1999, 21(4): 7-12. (in Chinese)
- [2] 郑礼宝. 全尺寸二元喷管红外辐射特性研究[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 140-142.
ZHENG Libao. Infrared emissions from turbojet with two-dimensional nozzle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 140-142. (in Chinese)
- [3] 刘长春,吉洪湖,李娜,等. 一种二元S弯喷管的红外辐射特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(9): 1567-1570.
LIU Changchun, JI Honghu, LI Na, et al. Numerical simulation on infrared radiant characteristics of 2D S-nozzles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1567-1570. (in Chinese)
- [4] 张勃,吉洪湖. 大宽高比矩形喷管的射流与外流的掺混特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 104-110.
ZHANG Bo, JI Honghu. Numerical study of internal and external flow mixing for rectangular nozzles with large aspect ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 104-110. (in Chinese)
- [5] Lee C C. Subsonic diffuser design and performance for advanced fighter aircraft[R]. AIAA 85-3073, 1985.
- [6] 张武生,薛巍,李建江,等. MPI并行程序设计实例教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [7] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- [8] 潘丞雄,张靖周,邵万仁. 齿冠状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. Numerical research on flow dynamics and infrared radiant characteristics for scaled chevron convergent nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1518-1523. (in Chinese)
- [9] 罗昕,张靖周,单勇. 加遮挡板后二元喷管的红外辐射特性数值模拟[J]. 推进技术, 2008, 29(6): 696-700.
LUO Xin, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical research on infrared radiation characteristics of two dimensional nozzle with shelter baffles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(6): 696-700. (in Chinese)
- [10] 施小娟,吉洪湖,罗明东. 发动机背负式安装无人机的排气系统红外特征的计算研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 651-656.
SHI Xiaojuan, JI Honghu, LUO Mingdong. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for exhaust system of an UAV with engine installed on the back of the fuselage[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 651-656. (in Chinese)
- [11] 杨承宇,张靖周,单勇. 单边膨胀喷管红外辐射特性的数值模拟[J]. 航空学报, 2010, 31(10): 1920-1926.
YANG Chenyu, ZHANG Jingzhou, SHAN Yong. Numerical simulation on infrared radiation characteristics of single expansion ramp nozzles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(10): 1920-1926. (in Chinese)
- [12] 张小英,王先炜. 轴对称矢量喷管红外特性的数值计算研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 367-369.
ZHANG Xiaoying, WANG Xianwei. Numerical research of infrared characteristics of axial-symmetrical vectored nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 367-369. (in Chinese)
- [13] 金捷,朱谷君,徐南荣,等. 发动机高速排气系统红外辐射特性的数值计算和分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 583-585.
JIN Jie, ZHU Gujun, XU Nanrong, et al. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for aeroengine high-speed exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 583-585. (in Chinese)
- [14] 刘林华,董士奎,余其铮,等. 红外 $1\sim 14\mu\text{m}$ 波长间隔 $0.1\mu\text{m}$ 上大气平均透过率: II 水蒸气的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(6): 75-78.
LIU Linhua, DONG Shikui, YU Qizheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval $0.1\mu\text{m}$ form infrared 1 to $14\mu\text{m}$: II transmittance of water vapor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(6): 75-78. (in Chinese)
- [15] 刘林华,董士奎,余其铮,等. 红外 $1\sim 14\mu\text{m}$ 波长间隔 $0.1\mu\text{m}$ 上大气平均透过率: I 二氧化碳的透过率[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(5): 8-12.
LIU Linhua, DONG Shikui, YU Qizheng, et al. Atmospheric mean transmittance in wavelength interval $0.1\mu\text{m}$ form infrared 1 to $14\mu\text{m}$: I transmittance of carbon dioxide[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(5): 8-12. (in Chinese)