

文章编号:1001-5078(2024)07-1097-05

· 红外技术及应用 ·

喷气式飞机尾喷管及尾焰红外辐射特性测量分析

王东¹,高俊光²,陈磊¹,张恒伟¹,路亚旭¹
(1. 63891 部队,河南 洛阳 471003;2. 63893 部队,河南 洛阳 471003)

摘要:用3~5 μm 中波、8~12 μm 长波红外热像仪对某喷气式飞机侧飞状态的红外辐射特性进行了测量,得到该飞机尾喷管及尾焰的红外辐射亮度分布。结果表明,该状态下尾焰中波、长波辐射呈现对称包络分布,随着距离的增加,尾焰喷气束逐渐扩散,辐射亮度逐渐减弱。相同情况下,中波波段尾焰长度为长波的3.5倍左右、面积为6.3倍左右;尾喷管为该飞机辐射亮度最高的部位,中波辐射亮度对比度达到了20.1,长波辐射亮度对比度达到了8.2。

关键词:喷气式飞机;尾喷管;尾焰;红外辐射;辐射亮度

中图分类号:TN219;TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.015

Measurement and analysis of infrared radiation characteristics of jet airplane nozzle and flame

WANG Dong¹,GAO Jun-guang²,CHEN Lei¹,ZHANG Heng-wei¹,LU Ya-xu¹
(1. 63891 Unit of PLA,Luoyang 471003,China;2. 63893 Unit of PLA,Luoyang 471003,China)

Abstract:The infrared radiation characteristics of a jet airplane in side-flying state are measured by a 3~5 μm medium-wave and 8~12 μm long-wave thermal imager,and the infrared radiation luminance distribution of the jet nozzle and tail flame is obtained. The results show that the mid-wave and long-wave radiation of the tail flame in this state presents a symmetrical envelope distribution,and with the increase of distance,the jet beam of the tail flame gradually diffuses,and the radiation brightness gradually decreases. Under the same circumstances,for the same case,the medium-wave band tail flame is about 3.5 times longer and 6.3 times larger than the long-wave one. The tail nozzle is the brightest part of the aircraft's radiation,with contrast ratios of 20.1 in the medium-wave radiation and 8.2 in the long-wave radiation.

Keywords: jet airplane;tail nozzle;exhaust plume;IR radiation;radiant intensity

1 引言

喷气式飞机尾喷管及尾焰的红外辐射是一个重要的红外辐射源,在整个飞机的辐射中占有重要地位。研究尾喷管及尾焰红外辐射可为红外预警探测、红外成像制导、红外目标隐身等提供重要的参考数据。目前,关于喷气式飞机尾喷管及尾焰红外辐射特性的研究方法主要有仿真和实测两种。仿真研究大多采用简易的工程算法,但在精度和通用性方

面存在一定差距,例如,王霄等根据不同飞行状态下空中目标蒙皮和尾焰的红外辐射特性,仿真分析了相应飞行状态的红外辐射特性^[1];蒋建峰等针对全尺寸单锯齿排气系统进行数值仿真,分析了喷管红外特性、气动性能受喷管结构的影响规律^[2];柴世杰等针对发动机尾焰、尾喷管和飞机蒙皮,提出了基于温度场分布的飞机红外辐射计算方法^[3];刘鑫等提出了一种目标全向红外辐亮度特征简化建模方

基金项目:XX 科研项目(No. 2100110077)资助。

作者简介:王东(1978-)男,硕士,高级工程师,主要研究方向为光电对抗。E-mail:wd_hardman@163.com

收稿日期:2023-10-25;修订日期:2023-12-14

法,并验证了模型的准确性^[4]。作为重要手段的实测研究,近年来已有不少研究报道。陈书恒等采用光谱辐射计、热像仪等对飞机的静态红外辐射特性进行了全向测试^[5];许帆等开展了某型发动机红外辐射特性测试,为发动机红外特性研究提供了技术支持^[6];邹前进等测量了夜间条件下某靶机不同方位长波红外辐射强度,并与背景灰度进行了对比分析^[7];本文作者在文献[8]中测量得到了某固定翼飞机 8 ~ 14 μm 波段非加力状态不同方向尾焰红外辐射亮度及分布,并对测量结果进行了分析。本文在此基础上,采用中波、长波红外热像仪对某喷气式飞机侧飞状态的红外辐射进行了测量,得到该飞机尾喷管及尾焰的红外辐射亮度分布,并进行了对比分析。

2 红外辐射传输及反演

空中目标红外辐射在大气中传输过程,大气中的分子、气溶胶粒子等会对红外辐射产生吸收、散射及衰减,同时大气自身红外辐射又叠加到空中目标红外辐射上,经过一定距离的大气路径传输后,进入测量设备,如图 1 所示。

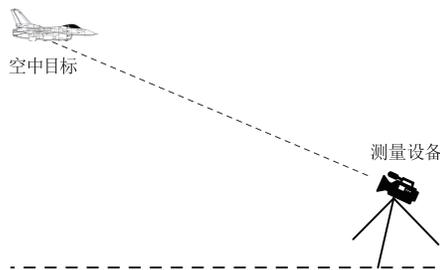


图 1 测量示意图

Fig. 1 Measurement diagram

红外辐射到达测量设备红外热像仪后,红外辐射传输模型可表示为^[9-11]:

$$DN = \alpha \cdot [\tau_{\alpha} L_t + L_{\text{path}}] + DN_0 \quad (1)$$

式中, DN 为红外热像仪的数码输出值(灰度); α 为红外热像仪的辐射亮度响应度; DN_0 为红外热像仪自身热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流等引起的偏移值。 L_t 为空中目标的辐射亮度; τ_{α} 为空中目标与红外热像仪之间的大气透过率; L_{path} 为空中目标与红外热像仪之间的大气程辐射。由式(1)可反演得到空中目标的红外辐射亮度为:

$$L_t = \left(\frac{DN - DN_0}{\alpha} - L_{\text{path}} \right) / \tau_{\alpha} \quad (2)$$

3 测量设备及标定

3.1 测量设备

测量过程使用的设备包括中波红外热像仪、长波红外热像仪、ISDC IRI50 黑体、气象设备等。主要测量设备参数见表 1,表 2。

表 1 红外热像仪参数

Tab. 1 Technical parameters of measuring equipment

性能指标	中波热像仪参数	长波热像仪参数
工作波段/ μm	3 ~ 5	8 ~ 12
像元数	640 × 512	640 × 480
量化位数/bit	14	14
帧频/Hz	50	50

表 2 ISDC IRI50 黑体参数

Tab. 2 Technical parameters of ISDC IRI50 blackbody

名称	参数
温度范围	环境温度 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$
辐射面积/ mm^2	300 × 300
发射率	0.96
温度分辨率/ $^{\circ}\text{C}$	0.1
温度精度/ $^{\circ}\text{C}$	± 0.2

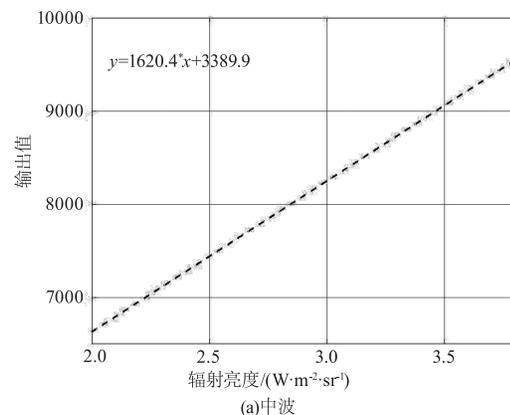
3.2 标定及结果

标定过程,首先固定红外热像仪参数及使用状态,然后依次对不同温度的黑体进行测量,得到其辐射亮度响应度 α 和自身偏移值 DN_0 之间的对应关系,标定模型如下^[10-11]:

$$DN = \alpha L + DN_0 \quad (3)$$

其中, L 为黑体在红外热像仪测量波段内的辐射亮度。

图 2、图 3 给出了标定结果,其中,横坐标为 ISDC IRI50 面源黑体在红外热像仪测量波段内的辐射亮度 $L(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$,纵坐标为红外热像仪响应不同温度黑体辐射时的数码输出值 DN (灰度)。



(a)中波

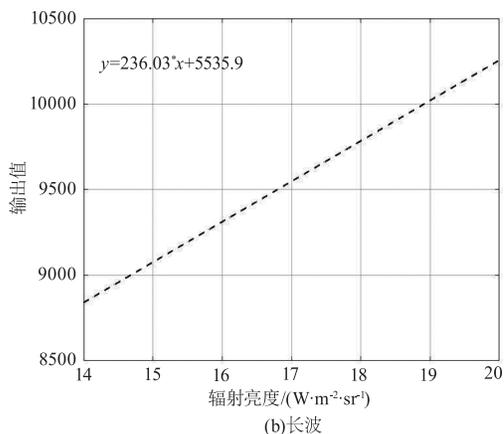


图2 红外热像仪标定结果

Fig.2 Calibration results of infrared imager

利用 Matlab 对定标结果进行线性拟合,得到中波红外热像仪、长波红外热像仪辐射亮度响应关系为:

$$DN_1 = 1620.4 \times L + 3389.9$$

$$DN_2 = 236.03 \times L + 5535.9$$

标定误差主要包括:ISDC IRI50 黑体光谱辐射出射度误差、红外热像仪光学系统透过率不确定度引起的误差、红外热像仪输出信号误差、红外热像仪探测器响应不稳定误差、外界环境及背景辐射进入红外热像仪光学系统引起的误差,上述误差一般可控制在 2%、2%、1%、2%、1%,经计算由标定总误差约为 3.74%。

4 测量结果及分析

4.1 测量结果

利用文中的目标红外辐射传输及反演方法,对某型喷气式飞机进行测量,测量时间为夏季白天,天气晴朗,能见度 25km 以上,温度 27.1~29.4℃,湿度 45.6%~48.3%。测量得到该飞机侧飞状态的归一化尾喷管和尾焰辐射亮度分布如图 3、图 4 所示。图中的包络线为等亮度曲线,横纵坐标均为像素数。

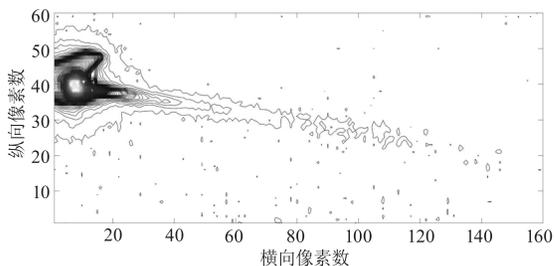


图3 尾焰中波辐射等亮度曲线

Fig.3 Iso luminance curve of mid-wave radiation in tail flame

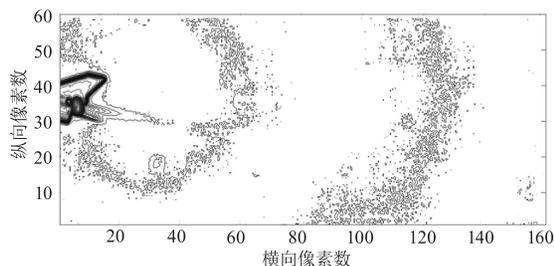


图4 尾焰长波辐射等亮度曲线

Fig.4 Iso luminance curve of long wave radiation in tail flame

从测量结果可以得到如下结论:

(1) 侧飞状态该飞机尾焰中波、长波辐射亮度沿发动机尾喷管轴线均呈现对称包络分布。在初始的核心区,尾焰喷气束形状特征与尾喷管喷口处的特征接近。随着与尾喷管轴线横向、纵向距离的增加,尾焰喷气束扩散后逐渐变宽,辐射亮度逐渐减弱,边界逐渐模糊,直至消失在大气中。

(2) 相同情况下,该飞机尾焰中波辐射更为明显,中波波段尾焰长度为长波波段尾焰长度的 3.5 倍左右、面积为 6.3 倍左右;受尾喷管、尾焰加热影响,周围空气温度升高,辐射亮度高于其他背景辐射亮度。

(3) 受环境及大气扰动、飞机尾喷管出口气流不均匀等因素影响,随着与尾喷管轴线横向距离增加,尾焰中波、长波辐射亮度分布的对称性和一致性均呈现下降趋势。

为了便于分析该飞机尾喷管及尾焰不同部位与背景辐射亮度差异,采用相对对比度描述辐射亮度,如公式(4)所示:

$$C = \frac{|L_t - L_b|}{L_b} \tag{4}$$

式中,C 为目标与背景辐射亮度相对对比度, L_t 为目标辐射亮度, L_b 为背景辐射亮度。

图 5 给出了测量得到的该飞机尾喷管、尾焰不同部位的辐射亮度对比度结果。图中曲线为从尾喷管开始沿其轴线方向不同位置的尾焰辐射亮度对比度,测量时,背景辐射亮度取值为尾焰附近未被加热的局部背景辐射亮度平均值。

从图中可以看出,尾喷管为测量部位中辐射亮度最高的部位,尾喷管中波辐射亮度对比度达到了 20.1,长波辐射亮度对比度达到了 8.2。尾焰喷气束在喷射出尾喷管后,中波、长波辐射亮度均迅速下降,直至与背景一致。

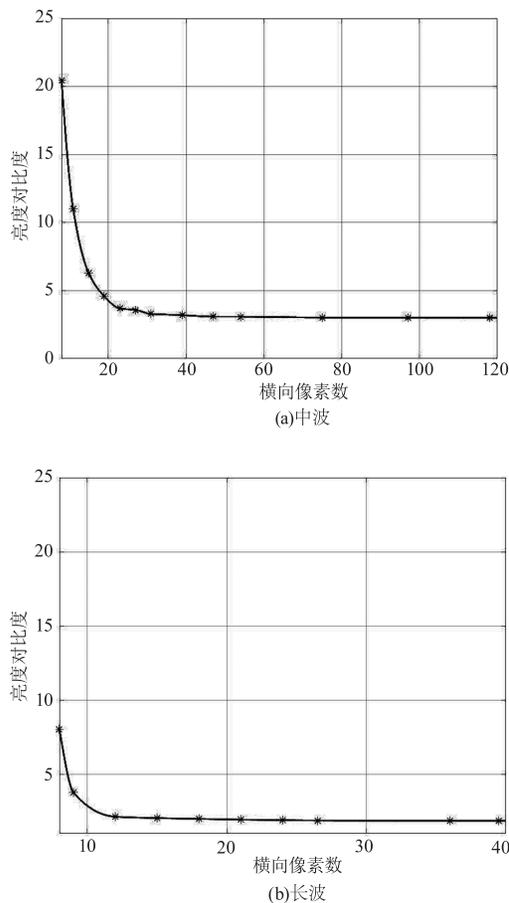


图5 尾焰辐射亮度对比度曲线

Fig. 5 Contrast-pair curve of infrared radiation in tail flame

4.2 测量误差分析

除 3.74 % 的标定误差外,测量过的误差还包括:①由于测量时间较长,环境条件变化可能导致红外热像仪自身热稳定性变化,造成测量状态与标定状态不一致,带来的误差约在 5 % 左右。②大气透过率 τ_α 和程辐射 L_{path} 的不确定度取决于采用的大气模型和气象输入参数的精度,在计算大气透过率和程辐射时采用的是 MODTRAN 大气模型。由于该模型输入参数较多,与实际测量的大气条件存在一定的误差,该计算带来的误差约在 25 % 左右。根据以上的各单项误差的分析,本次测量的总误差约在 25.7 % 左右。

通过上述误差分析,目标特性测量的难点主要包括:①如何提高大气透过率和程辐射的计算精度。②如何减小红外热像仪自身热稳定性变化造成的测量状态与标定状态不一致问题。难点一可通过实际测量大气透过率、天空背景辐射并对大气模型进行修正,或直接采用更高精度大气模型等方式解决。难点二可通过在测量开始、中间、结束等时段增加标

定次数,或选择热稳定性好的红外热像仪等方式解决。

5 结语

利用中波、长波红外热像仪测量了某型喷气式飞机侧飞状态尾焰辐射特性,通过反演计算得到了该飞机不同部位的红外辐射亮度及分布。经分析,尾喷管为该飞机辐射亮度最高的部位,尾焰辐射亮度沿尾喷管轴线均呈现对称包络分布,随着与尾喷管轴线横向、纵向距离的增加,尾焰喷气束扩散后逐渐变宽,辐射亮度逐渐减弱,对称性和一致性均呈现下降趋势。相同情况下,尾焰中波辐射对比度更高。文中的研究成果可为目标特性建模、红外侦察探测及相关装备研制提供一定的支撑。

参考文献:

- [1] Wang Xiao, Gao Sili, et al. Multi-band infrared radiation characterization and simulation analysis for aerial target [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(5): 0511002 - 1 - 0511002 - 11. (in Chinese)
王霄,高思莉,金璐,等.空中目标多波段红外辐射特性描述与仿真分析[J].光子学报,2020,49(5): 0511002 - 1 - 0511002 - 11.
- [2] Jiang Jianfeng, Zheng Jiansheng. Research on aerodynamic and infrared signature of vectoring nozzle with chevron [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 234 - 239. (in Chinese)
蒋建峰,征建生.锯齿矢量喷管气动和红外辐射特性研究[J].激光与红外,2022,52(2): 234 - 239.
- [3] Chai Shijie, Tong Zhongxiang, Li Jianxun, et al. Infrared radiation characteristics and detection of stealth aeroplane [J]. Fire Control & Command control, 2014, 39(8): 26 - 29. (in Chinese)
柴世杰,童中翔,李建勋,等.典型飞机红外辐射特性及探测仿真研究[J].火力与指挥控制,2014,39(8): 26 - 29.
- [4] Liu Xin, Ou Yuan, Feng Fuqiang, et al. Experimental and modeling research on infrared characteristics of a target [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(11): 153 - 157. (in Chinese)
刘鑫,欧渊,冯富强,等.靶机红外特性实验与建模研究[J].中国测试,2020,46(11): 153 - 157.
- [5] Chen Shuheng, Zhu Niyao, Chen Ning, et al. Test of infrared radiation characteristics of aircraft and study on launch strategy for infrared decoy flare [J]. Infrared Tech-

- nolog,2021,43(10):949-953. (in Chinese)
- 陈书恒,朱倪瑶,陈宁,等.飞机红外辐射特性测试及红外干扰弹投放方式研究[J].红外技术,2021,43(10):949-953.
- [6] Xu Fan, Yao Kaikai, Zhang Ruijuan, et al. Infrared radiation characteristic testing and evaluating technology of aero-engine[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1223-1227. (in Chinese)
- 许帆,姚凯凯,张锐娟,等.航空发动机红外辐射特性测试评估技术[J].激光与红外,2019,49(10):1223-1227.
- [7] Zou Qianjin, Liu Shengli, Liu Xiaohu, et al. Analysis of long-wave infrared radiation characteristics of aerial target in different azimuth at night [J]. Infrared Technolog, 2023, 45(1): 64-68. (in Chinese)
- 邹前进,刘胜利,刘小虎,等.空中目标夜间不同方位长波红外辐射特性分析[J].红外技术,2023,45(1):64-68.
- [8] Wang Dong, Li Wuzhou, Zhang Lei, et al. Measurement and analysis of the exhaust plume infrared radiation of air-plane at non-afterburning mode [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(6): 58-62. (in Chinese)
- 王东,李武周,张雷,等.固定翼飞机非加力状态尾焰红外辐射特性测量及分析[J].光学与光电技术,2016,14(6):58-62.
- [9] Yang Xiangyun, LV Yong, Liu Yang, et al. Research on target infrared characteristic modeling technology in target system [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(10): 1336-1341. (in Chinese)
- 杨翔云,吕勇,刘洋,等.靶标系统中的目标红外特性建模技术研究[J].激光与红外,2021,51(10):1336-1341.
- [10] Wang Dong, Zhao Wei, Shao Ming, et al. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. Infrared Technolog, 2015, 37(6): 519-522. (in Chinese)
- 王东,赵威,邵铭,等.固定翼飞机地面红外辐射特征测量及分析[J].红外技术,2015,37(6):519-522.
- [11] Guo Hanzhou, Guo Lihong, Yang Ciyin, et al. Infrared radiation measurement based on proportional correction of atmospheric path radiation [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 198-202. (in Chinese)
- 郭汉洲,郭立红,杨词银,等.基于大气程辐射比例修正的红外辐射特性测量[J].激光与红外,2017,47(2):198-202.