

文章编号: 1672-8785(2017)01-0018-05

某喷气发动机尾焰的中长波红外 辐射分析和比较

王 东 白 冰 张 雷 李武周 纪 磊

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 利用中波红外和长波红外热像仪对某型喷气飞机发动机尾焰的红外辐射特性进行了测量, 得到了 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的尾焰辐射亮度分布。结果表明, 从飞机尾向上观测到的中波红外和长波红外尾焰均成对称分布, 前者的最高辐射亮度和尾焰面积分别是后者的 4.6 倍和 2.1 倍; 从飞机侧向上观测到的中波红外尾焰的最高辐射亮度、尾焰长度和面积分别是长波红外尾焰的 2.2 倍、3.8 倍和 5.7 倍, 前者的优势非常明显。另外, 受高温尾焰加热的影响, 尾焰周围空气的温度明显上升, 使其辐射亮度高于其他背景的辐射亮度。本文获得的测量结果对尾焰红外辐射特性仿真和计算研究具有一定的参考价值。

关键词: 发动机; 尾焰; 红外辐射; 辐射亮度; 热像仪

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.01.004

Analysis and Comparison of Middle and Long Wave Infrared Radiant Intensity of Jet Engine Exhaust Plume

WANG Dong, BAI Bing, ZHANG Lei, LI Wu-zhou, JI Lei

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: The infrared radiation characteristics of exhaust plume from a certain type of jet engine were measured by using mid-wave and long wave infrared thermal imagers. The radiation intensity of the exhaust plume in mid-wave and long wave bands was obtained. The result showed that both mid-wave and long wave exhaust plume observed from aircraft tail exhibited symmetrical distribution. The greatest radiation intensity and area of the former were 4.6 and 2.1 times as those of the latter respectively. The greatest radiation intensity, plume length and area of mid-wave infrared plume observed from the side of aircraft were 2.2, 3.8 and 5.7 times as those of long wave infrared plume respectively. The advantages of the former were more obvious. In addition, because of the influence of high temperature heating of plume, the temperature of the air around plume rises significantly. Its radiation intensity was higher than that of other background. The measurement results obtained were of referential value to the simulation and calculation of infrared radiation characteristics of aircraft plume.

Key words: engine; exhaust plume; IR radiation; radiant intensity; thermal imager

收稿日期: 2016-11-28

作者简介: 王东(1978-), 男, 内蒙古磴口人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光电技术及应用。

E-mail: wd.hardman@163.com

0 引言

作为一种重要的空中目标, 喷气飞机的红外辐射主要来自飞机蒙皮、发动机尾喷口和发动机尾焰等。其中, 尾焰是航空煤油经过发动机燃烧室燃烧后从喷口排出的一种高温高压气体, 主要由 CO_2 和 H_2O 构成^[1-3]。喷气飞机尾焰的红外辐射在预警探测、目标跟踪、隐身设计、精确制导等领域具有重要的应用价值。目前, 尾焰红外辐射特性研究主要包括理论计算和实际测量两方面。其中, 理论计算原理简单、高效快捷, 可任意设置参数且易于分析。鉴于此, 国内已经开展了大量的研究工作^[4-8]。

作为尾焰红外辐射研究的另一种重要手段, 实测研究受到目标协调、组织实施以及测量条件等方面的限制, 因而较少见诸报道。文献[9]对某型发动机在地面试车条件下的红外辐射特性进行了测试, 得到了不同马赫数 (Ma) 下的辐射强度变化情况, 并将其与仿真结果进行了对比。文献[10]对某型固定翼飞机尾焰的长波红外辐射特性进行了测量, 并对加力状态和非加力状态下尾焰辐射的亮度和面积进行了分析与对比。文献[9]虽然开展了实测研究, 但是其测量状态并非飞机飞行状态。文献[10]虽然对飞机在飞行状态下的尾焰辐射进行了测量, 但是受测量条件的限制, 他们仅仅得到了长波波段的测量结果。因此, 本文在上述测量研究的基础上作更进一步的研究, 即利用 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中波红外和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 长波红外热像仪同时对尾焰的中长波红外辐射特性进行测量。具体说来, 我们对某喷气飞机在尾向和侧向两种条件下的尾焰辐射亮度及分布进行测量, 并对其进行分析和比较。

1 测量设备

测量设备为面阵型中波红外和长波红外热像仪各一台。采用美国 ISDC 公司生产的 IRI50 型面源黑体对红外热像仪进行标定。表 1 和表 2 分别列出了红外热像仪和 IRI50 型面源黑体的具体参数。

表 1 红外热像仪的具体参数

参数	中波红外热像仪	长波红外热像仪
工作波段 (μm)	3 ~ 5	8 ~ 12
帧频 (Hz)	50	50
像元尺寸 (μm)	25×25	25×25
像元数	320×240	320×240
量化位数	14	14
制冷器	斯特林制冷	斯特林制冷

表 2 IRI50 型面源黑体的具体参数

项目	黑体参数
温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	环境温度约为 500°C
温度分辨率 ($^{\circ}\text{C}$)	0.1
温度精度 ($^{\circ}\text{C}$)	± 0.2
辐射面积 (mm)	300×300
发射率	0.96 ± 0.02

2 设备标定及测量模型

2.1 设备标定

测量前, 将中波红外和长波红外热像仪平行安装在转台上, 并对其光轴进行校准。基于直接扩展源法, 利用 IRI50 型面源黑体对红外热像仪进行标定。将该黑体置于红外热像仪的镜头处, 并依次设置不同的温度。通过用中波红外和长波红外热像仪对不同温度的 IRI50 型面源黑体进行测量, 可以得到红外热像仪的辐射亮度响应度 α 与其偏移值 DN_0 之间的对应关系^[11-12]。

图 1 所示为中波红外和长波红外热像仪的标定结果。其中, 横坐标为辐射亮度 L ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), 纵坐标为红外热像仪的输出灰度值 DN 。

通过对标定结果进行线性拟合, 可以得到辐射亮度与响应度的关系: $DN = 1620L + 3390$ (中波红外) 和 $DN = 236L + 5536$ (长波红外)。

2.2 测量模型

测量时需要考虑大气程辐射和大气衰减对尾焰辐射亮度测量的影响并对其进行修正。其测量模型为^[12]

$$L_t = \left(\frac{DN - DN_0}{\alpha} - L_{path} \right) / \tau_{\alpha} \quad (1)$$

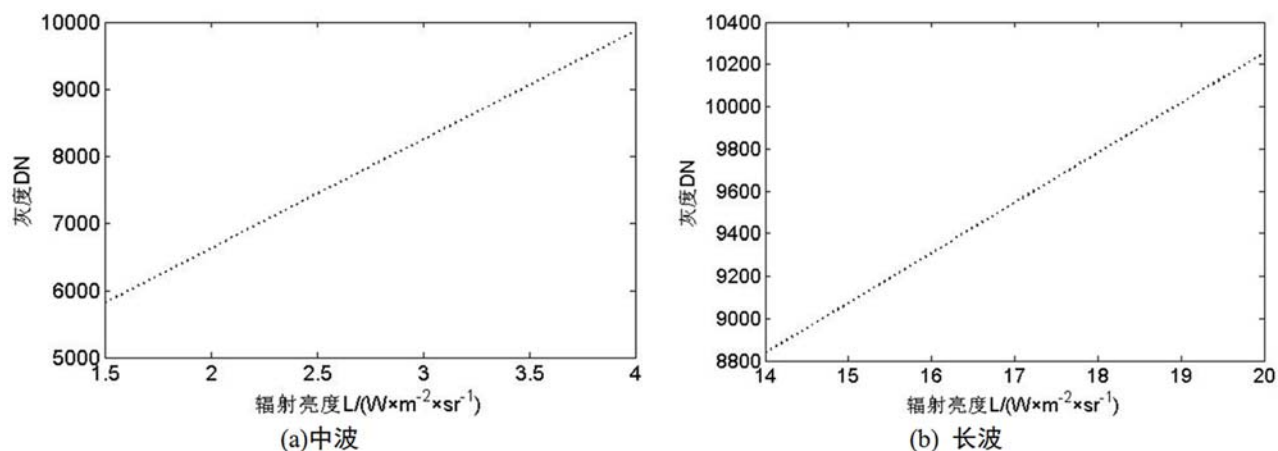


图 1 红外热像仪的标定结果

式中, L_t 为尾焰的辐射亮度; DN 为红外热像仪的输出灰度值; DN_0 为红外热像仪输出灰度的偏移值; α 为红外热像仪的辐射亮度响应度; L_{path} 为目标与红外热像仪之间的大气程辐射亮度; τ_a 为目标与红外热像仪之间的大气透过率。 L_{path} 和 τ_a 可由 MODTRAN 大气辐射传输软件计算得到。

3 测量结果及分析

利用测量模型、标定结果、大气参数、目标位置信息、测量数据以及 MODTRAN 大气辐射传输软件等, 得到了不同方向上目标机尾焰的辐射亮度。表 3 列出了测量期间的大气参数。

表 3 测量期间的大气参数

项目	大气参数
能见度 (km)	21.8 ~ 25.6
温度 (°C)	18.2 ~ 26.8
大气压 (kPa)	100.92
相对湿度 (%)	24.6 ~ 29.4
海拔高度 (m)	144

图 2 和图 3 所示为某型双发飞机处在发动机加力起飞状态时, 从飞机侧后方 (160° 方向) 观测到的归一化尾焰辐射亮度分布。

由测量结果可知, 从飞机尾部观测到的中波红外和长波红外尾焰均为对称分布, 中心区域的辐射亮度最强, 且辐射能量都集中在发动机的喷管出口附近。在长波红外波段, 由于辐射

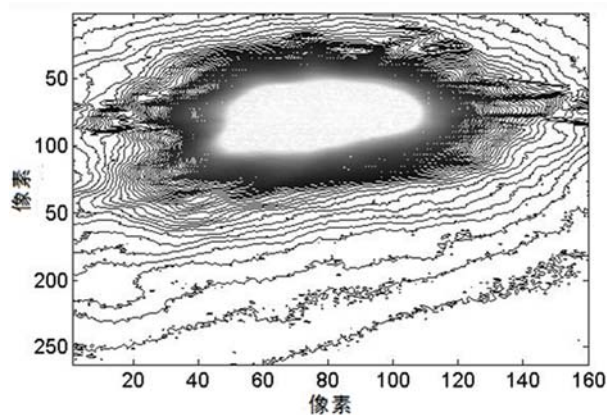


图 2 在加力状态下, 从 160° 方向上观测到的归一化尾焰中波红外辐射亮度分布

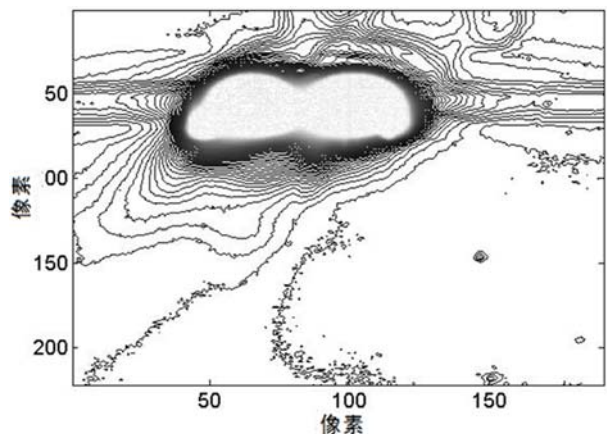


图 3 在加力状态下, 从 160° 方向上观测到的归一化尾焰长波红外辐射亮度分布

亮度较弱, 尾焰面积较小, 且两个喷管喷射尾焰的交叠部分较少, 因此其分布更加接近于发动机喷管的“8”字型分布。在中波红外波段, 由于辐射亮度较强, 尾焰面积较大, 且两个喷管喷

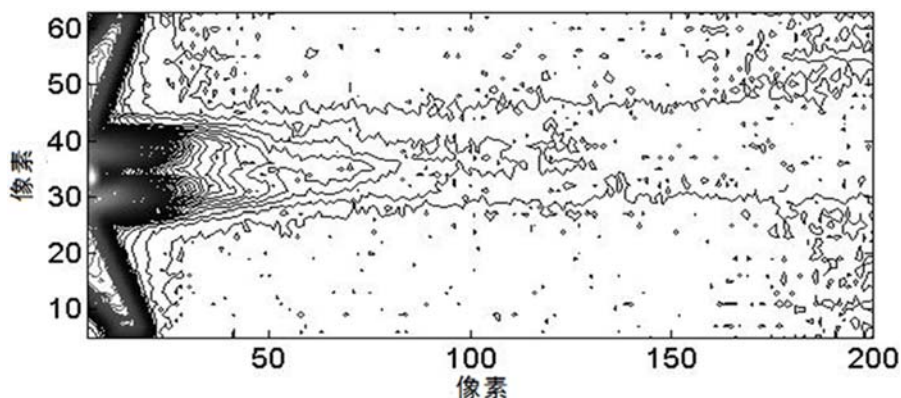


图 4 在巡航状态下, 从 70° 方向上观测到的归一化尾焰中波红外辐射亮度分布

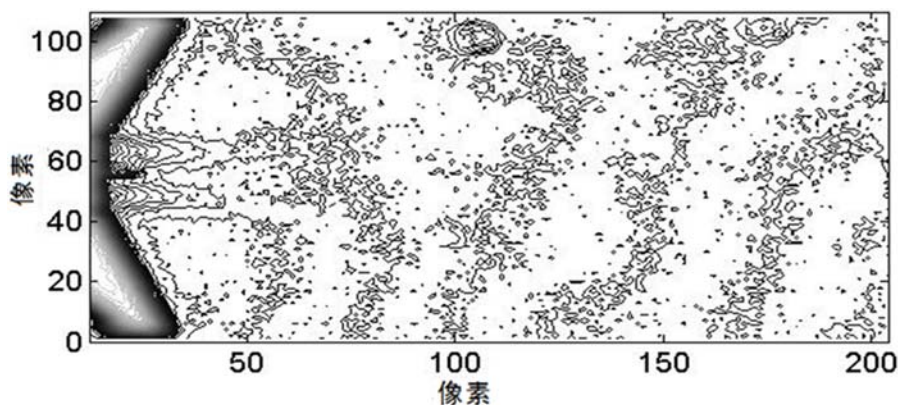


图 5 在巡航状态下, 从 70° 方向上观测到的归一化尾焰长波红外辐射亮度分布

射尾焰的交叠部分较多, 因此其分布更加接近于跑道形分布。中波红外尾焰的最高辐射亮度和面积分别是长波红外尾焰的 4.6 倍和 2.1 倍。从尾焰的中心区域向外看, 随着喷焰燃气温度的降低、组分变化以及浓度的下降, 尾焰辐射亮度迅速减弱; 受高温尾焰加热的影响, 尾焰周围空气的温度上升, 使其辐射亮度明显高于其他背景的辐射亮度。

图 4 和图 5 所示为某型双发飞机处在空中巡航状态时, 从航线正下方的迎头方向上以 70° 仰角观测到的归一化尾焰辐射亮度分布 (为了便于比对, 将尾焰方向旋转了 90°)。

从图 4 和图 5 中可以看出, 从该方向上观测到的中波红外和长波红外尾焰辐射亮度沿发动机喷管轴向均呈对称包络分布, 而且随着与喷口距离的不断增加, 尾焰的辐射亮度逐渐减弱。另外, 中波红外尾焰的辐射亮度明显强于长波红外尾焰, 前者的最高辐射亮度、尾焰长度和

面积分别是后者的 2.2 倍、3.8 倍和 5.7 倍。在长波红外波段, 由于辐射亮度较弱, 两个喷管喷射尾焰的交叠部分较少, 基本上以各自喷管轴向呈独立的对称分布。而在中波红外波段, 由于辐射亮度显著增强, 两个喷管喷射尾焰的交叠部分较多, 且尾焰在形状上明显异于长波红外波段; 受高温尾焰加热的影响, 尾焰周围空气的温度明显上升, 使其辐射亮度高于其他背景的辐射亮度。

4 结束语

本文采用直接扩展源法对 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中波红外和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 长波红外热像仪进行了标定, 并对某型喷气飞机在尾向加力飞行状态和迎头巡航飞行状态下的尾焰辐射进行了测量, 得到了两个波段的尾焰辐射亮度及分布。测量结果表明, 在侧向和尾向探测时, 尾焰是该飞机的主要辐射源。在此阶段, 由于尾焰辐射能量主要分布

在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, 利用中波红外热像仪更加有利于对目标进行侦察和探测。而在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段, 由于尾焰辐射较弱, 在前向探测 (加上机身遮挡) 时, 蒙皮是该飞机的主要辐射源。此时利用长波红外热像仪更加有利于对目标进行侦察和探测。本文获得的测量结果对尾焰红外辐射特性仿真和计算研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张合, 江小华. 目标探测与识别技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [2] 杨照金, 崔东旭. 军用目标伪装隐身技术概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [3] 张术坤, 蔡静. 尾焰红外辐射特性计算研究综述 [J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1277-1281.
- [4] 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.
- [5] 张术坤, 蔡静, 杨永军. 尾焰红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2604-2609.
- [6] 陈炳峰, 方亦浩, 徐晓刚. 飞机的红外辐射特征研究 [J]. 航空兵器, 2005, 25(5): 30-32.
- [7] 吕建伟, 王强. 飞行器蒙皮红外辐射特征的反向蒙特卡罗计算与分析方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 232-237.
- [8] 窦晓牧, 岳晓奎, 罗建军. 喷气式飞机全向红外辐射特性计算方法 [J]. 红外技术, 1997, 19(3): 5-7.
- [9] 李建勋, 童中翔, 刘万俊, 等. 航空发动机红外辐射实验与仿真 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 549-550.
- [10] 杨宝庆, 王东, 路广勋, 等. 喷气飞机尾焰长波红外辐射亮度测量研究 [J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 68-71.
- [11] 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.
- [12] 杨词银, 张建萍, 郭立红, 等. 基于大气修正的目标红外辐射测量 [J]. 长春理工大学学报, 2010, 30(4): 1-4.

(上接第 17 页)

表 6 添加表面氧化层处理工艺后 InSb 晶片表面氧化层状态的对比

	表面氧化层 厚度 (nm)	表面氧化层组成	表面氧化层的 稳定性 (24 h)	脱氧温度 (MBE)
清洗完 (原有最终工艺)	7.3	In_2O_3 、 Sb_2O_3 和 Sb_2O_5	15.6 nm	无法脱氧
表面氧化层处理 完 (现最终工艺)	0.94	极少的 In_2O_3 、少量的 Sb_2O_3 和 Sb_2O_5	1.12 nm	在 400°C 附近 脱氧完全

本研究虽然对 InSb(100) 衬底表面氧化层的组成成分进行了一定的分析, 但是对氧化层成分成因的原理研究尚需继续深入。

参考文献

- [1] Nesher O, Klipstein P C. High-performance IR Detectors at SCD Present and Future [J]. Opto-Electronics Review, 2006, 14(1): 59-68.
- [2] 赵超, 周立庆. InSb 晶片的表面状态参数研究 [J]. 红外, 2015, 36(12): 18-26.
- [3] 陆春明, 李深, 董国胜. 化学腐蚀和硫处理对 InSb(111) 表面的影响 [J]. 物理学报, 1992, 41(4): 675-682.
- [4] 刘铭, 程鹏, 肖钰, 等. InSb 薄膜分子束外延技术研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(11): 1256-1259.
- [5] 赵超, 周立庆. InSb 晶片的表面状态参数研究 [J]. 红外, 2015, 36(12): 18-26.
- [6] Papis-Polakowska E. Surface Treatments of GaSb and Related Materials for the Processing of Mid-Infrared Semiconductor Devices [J]. Electron Technology, 2006, 37(4): 1-34.
- [7] Tang X, Welzenis R G V, Setten F M V, et al. Oxidation of the InSb Surface at Room Temperature [J]. Semiconductor Science & Technology, 1986, 1(1): 355-365.
- [8] Liu W K, Santos M B. Characterization of Oxide Desorption from InSb(001) Substrates [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1996, 14(2): 647-651.