

·测试、试验与仿真·

## 喷气飞机尾焰长波红外辐射亮度测量研究

杨宝庆<sup>1</sup>, 王东<sup>1,2</sup>, 路广勋<sup>1</sup>

(1.中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003; 2.光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**对某喷气飞机尾焰红外辐射特性进行了测量,得到了8~14 μm长波波段尾焰红外辐射亮度及分布。测量结果表明,180°方向尾焰辐射亮度呈环形分布,辐射主要集中在发动机喷管出口附近,加力状态尾焰最高辐射亮度为非加力状态的2.4倍,尾焰面积为1.3倍;90°方向尾焰辐射亮度呈对称包络分布,加力状态尾焰最高辐射亮度为非加力的1.8倍,尾焰面积为2.3倍。

**关键词:**尾焰; 红外辐射; 辐射亮度; 程辐射

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0068-04

## Measurement Research on Long Wavelength Infrared Radiant Intensity from Jet Airplane Exhaust Plume

YANG Bao-Qing<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1,2</sup>, LU Guang-xun<sup>1</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China;

2. Key Laboratory of Electro-optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** By measuring the infrared radiation characteristics of jet airplane exhaust plume, the intensity and distribution of infrared radiation in 8~14 μm long band are obtained. Measurement results show that the exhaust plume radiant intensity at 180° direction distributes to ring and the radiation is concentrated near the engine nozzle outlet. The maximum radiant intensity and the plume area of after burner are 2.4 times and 1.3 times of non-after burner respectively. The exhaust plume radiant intensity at 90° direction distributes to symmetric envelope, the maximum radiant intensity and the plume area of after burner are 1.8 times and 2.3 times of non-after burner respectively.

**Key words:** exhaust plume; infrared radiation; radiant intensity; air path radiation

喷气飞机的红外辐射中,尾喷管和排气尾焰(热喷流)是重要的辐射源。若从尾部攻击来说,探测器接收到的红外辐射中,喷管辐射是主要的,尾焰辐射约为喷管辐射的八分之一。可是在飞行条件下,尾焰由于排气作用拖的很长,其红外辐射能可传向飞机的前半球,根据估算和实验测试结果<sup>[1]</sup>,飞机的辐射强度分布情况大致如图1所示。

由图可见,除尾喷管外,尾焰就成为招致飞机遭拦截或尾追攻击的主要危险。另外,尾焰的红外辐射特征又受燃气热喷流气体的成份、密度、几何形状及发动机的工作状态等一系列因素所制约,从

理论上研究尾焰的红外辐射特征是十分困难的,通常多采用模型实验研究方法,对尾焰的红外辐射特征进行测试和标定,为目标特性研究提供依据。因此,对喷气飞机尾焰红外辐射的实验测试研究,目前已成为国内外开展红外侦察探测、红外制导、红外隐身等技术研究的重要方向和课题<sup>[2-4]</sup>。

目前,关于喷气飞机尾焰红外辐射特性及其测量的研究,大多集中仿真建模及计算方面<sup>[5-10]</sup>,实测研究报道较少。在文献[11]中,测量得到了某喷气飞机地面滑跑状态不同部位、不同方向的长波红外辐射亮度,给出了辐射亮度与测试方位关系图<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2016-06-15

作者简介: 杨宝庆(1970-),男,陕西洋县人,工程硕士,高级工程师,主要从事光电技术及应用方面的研究。

在此基础上,采用8~14 μm长波红外测量设备对某喷气飞机在加力、非加力状态下的尾焰红外辐射特性进行了测量,得到了侧向和尾部的辐射亮度及分布情况,并进行了对比分析。

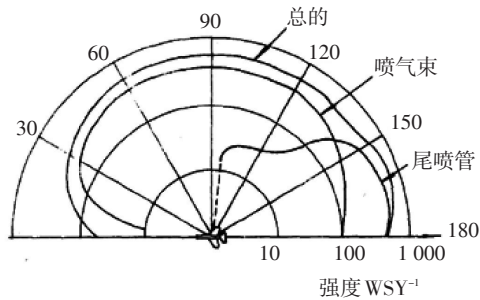


图1 飞机辐射强度空间分布极坐标图

## 1 实验测量系统简介

实验测量系统由长波红外测量设备、标准黑体、数据记录仪和有关保障设备设施等组成。长波红外测量设备置于飞机侧后方一定距离的安全位置,其探测窗口对准飞机尾部。

### 1.1 测量设备

(1)长波红外测量设备:用于测量目标飞机的辐射亮度,其工作波段8~12 μm,探测器为640×480面阵探测器,量化位数16 bit,帧频30 Hz。

(2)标准黑体:用于对长波红外测量设备进行定标,采用ISDC IRI50面源黑体,辐射面积300 mm×300 mm,工作温度范围为环境温度~500 ℃,发射率0.96±0.02,温度分辨率0.1 ℃。

### 1.2 测量步骤

(1)正式测量开始前,用标准黑体对长波红外测量设备进行定标;

(2)定标完成后,长波红外测量设备对目标飞机进行跟踪测量,记录目标飞机的状态信息,包括目标机速度、距离、视角角等;

(3)记录测量时间段内的环境参数,包括温度、湿度、压力、风速、风向、能见度等。

## 2 定标及数据处理方法

### 2.1 长波红外测量设备定标

要准确地完成对目标的红外辐射测量,除了选

择合适的红外辐射测量设备外,另一个重要的步骤就是应准确地掌握所选测量设备的性能。这不仅关系到测量的成败,而且也影响到对测量结果的解释。所谓定标就是对红外辐射测量设备性能进行测量的过程,在进行红外辐射测量时,至少应在测量之前和之后进行频繁而仔细的定标<sup>[12]</sup>。

用长波红外测量设备测量不同温度黑体的辐射亮度,得到长波红外测量设备的辐射亮度响应度 $\alpha$ 和其自身偏移值 $DN_0$ 之间的对应关系,定标模型如下<sup>[11,13]</sup>

$$DN = \alpha L + DN_0 \quad (1)$$

式中, $DN$ 为长波红外测量设备的输出灰度值; $L$ 为黑体在长波红外测量设备测量波段内的辐射亮度; $\alpha$ 为辐射亮度响应度; $DN_0$ 为长波红外测量设备自身光机结构热辐射、散射背景辐射以及探测器暗电流引起的灰度偏移值。

定标结果如图2所示。其中横坐标为黑体辐射亮度 $L$ (单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ),纵坐标为长波红外测量设备输出灰度值 $DN$ 。

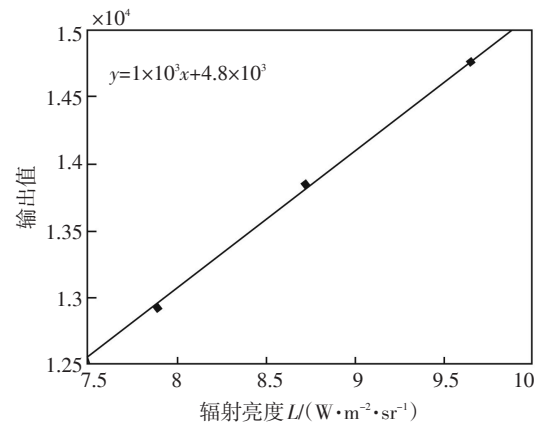


图2 长波红外测量设备定标结果

利用最小二乘法对定标结果进行线性拟合,得到长波红外测量设备辐射亮度响应关系为

$$DN = 1\,000 \times L + 4\,800 \quad (2)$$

### 2.2 数据处理方法

测量目标机尾焰红外辐射特性时,大气会造成目标机尾焰辐射的衰减,同时长波红外测量设备与目标机之间的大气程辐射又会造成辐射的叠加。因此,长波红外测量设备对尾焰的辐射测量模型为<sup>[13]</sup>

$$DN = \alpha [\tau_{\alpha} L_{\tau} + L_{\text{path}}] + DN_0 \quad (3)$$

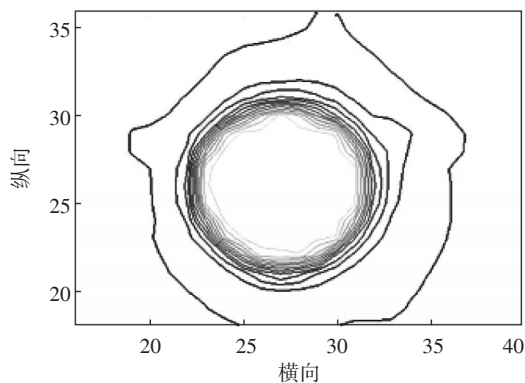
式中,  $\tau_\alpha$  为目标机与测量设备之间的大气透过率;  $L_t$  为尾焰辐射亮度;  $L_{\text{path}}$  为目标机与测量设备之间的大气程辐射亮度。其中,  $\tau_\alpha$ 、 $L_{\text{path}}$  可利用 MODTRAN 大气辐射传输软件计算得到。

由式(3)可反演得到尾焰辐射亮度为

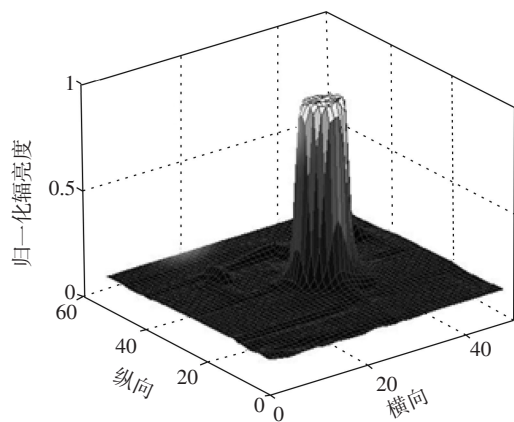
$$L_t = \left( \frac{DN - DN_0}{\alpha} - L_{\text{path}} \right) / \tau_\alpha \quad (4)$$

### 3 测量结果及分析

利用 MODTRAN 大气辐射传输软件、定标结果、测量数据及数据处理方法, 反演得到了不同方向目标机尾焰的辐射亮度。其中,  $0^\circ$  方向表示从机头沿机身轴线方向观测尾焰,  $90^\circ$  方向表示从垂直于机身轴线方向观测尾焰,  $180^\circ$  方向表示从飞机尾部沿机身轴线方向观测尾焰。图3给出了地面非加力状态从  $180^\circ$  方向观测得到的归一化尾焰辐射亮度分布。图4给出了空中加力状态从  $180^\circ$  方向附近观测得到的归一化尾焰辐射亮度分布。

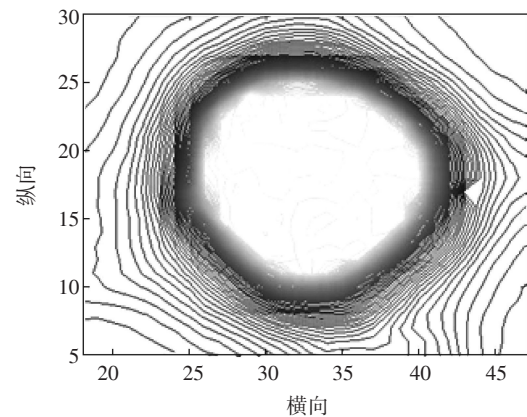


(a) 归一化等亮度曲线

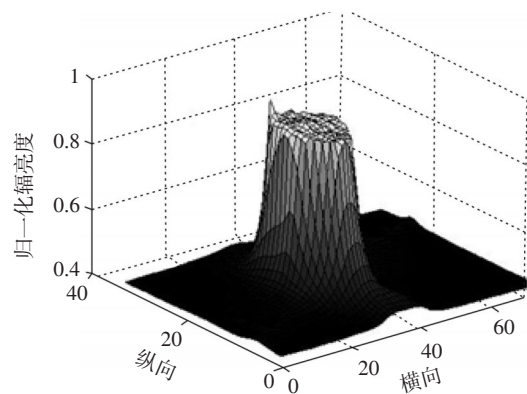


(b) 归一化亮度分布

图3 非加力状态  $180^\circ$  方向归一化尾焰辐射分布



(a) 归一化等亮度曲线



(b) 归一化亮度分布

图4 加力状态  $180^\circ$  附近归一化尾焰辐射分布

从测量结果可以得到如下结论,  $180^\circ$  方向观测到的尾焰辐射亮度在非加力和加力状态均呈环形分布, 等亮度曲线与发动机喷管形状一致, 辐射主要集中在发动机喷管出口附近; 中心区域辐射亮度最强, 分布较为对称, 亮度较为均匀, 加力状态相对于非加力状态, 最高辐射亮度增大到 2.4 倍, 尾焰面积增大到 1.3 倍; 从中心区域向外, 由于燃气温度、组分、浓度等条件的变化, 尾焰辐射亮度迅速减弱; 受尾焰加热影响, 周围空气温度升高, 辐射亮度高于其他背景辐射亮度; 受发动机喷管出口气流压力不均匀、外界大气扰动等因素影响, 从中心区域向外, 尾焰辐射亮度分布的对称性和一致性逐渐下降。

图5给出了目标机地面非加力状态从  $90^\circ$  方向观测到的尾焰辐射等亮度曲线。图6给出了目标机空中加力状态从  $90^\circ$  方向观测到的尾焰辐射等亮度曲线。

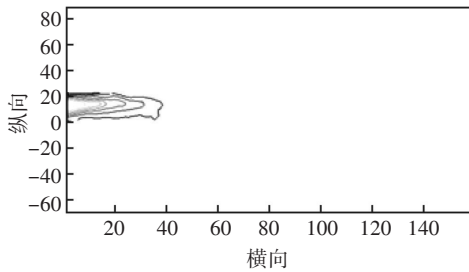


图5 非加力状态90°方向尾焰辐射等亮度曲线

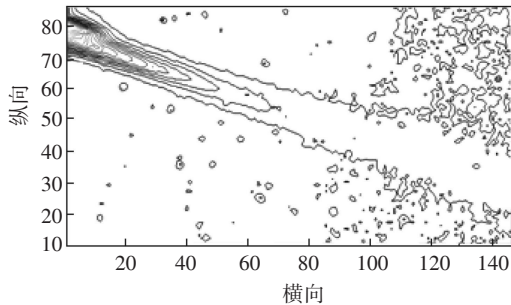


图6 加力状态90°方向尾焰辐射等亮度曲线

测量结果表明,90°方向观测到尾焰辐射亮度在非加力和加力状态沿发动机喷管轴向均呈对称包络分布,随着与喷管轴向距离的增加辐射亮度逐渐减弱。加力状态相对于非加力状态,最高辐射亮度增大到1.8倍,尾焰面积增大到2.3倍;受尾焰加热影响,周围空气温度升高,辐射亮度高于其他背景辐射亮度;受发动机喷管出口气流压力不均匀、外界大气扰动等因素影响,从中心区域向外,尾焰辐射亮度分布的对称性和一致性逐渐下降。

#### 4 结 论

利用8~14 μm长波红外测量设备测量了某喷气飞机加力、非加力状态尾焰辐射特性,用MODTRAN大气辐射传输软件计算了测量期间的大气透过率、程辐射,得到了目标机尾焰的辐射亮度及分

布。文中仅对目标机尾焰长波波段的辐射特性进行了测量,中波及其他波段的辐射特性还有待于进一步研究,并和研究结果进行分析比对。文中的研究成果可用于目标特性建模、红外侦察探测及相关装备研制等,为上述研究提供一定的数据支撑。

#### 参考文献

- [1] 山其骧,卜满.热喷流红外辐射特性的实验测试[J]. 测试技术学报,1994,8(4):157-160.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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(5):30-32.
- [8] 刘德成,张国英.飞机红外辐射特性飞行试验测量[J]. 飞行试验,2003,19(2):22-26.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 陈衡.红外物理学[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [13] 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(4):1-4.

#### 本 刊 声 明

《光电技术应用》期刊因主办单位搬迁,从2016年4月9日起通信地址变更为天津市空港经济区纬五道9号,邮编为300308。编辑部电话:022-59067938。投稿邮箱为aoc-cetc@vip.163.com。特此声明。

《光电技术应用》编辑部