

喷气发动机红外辐射成像测试、处理与评估

陈世国, 江 勇, 方浩百, 李 卒

(空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 航空喷气发动机的红外辐射特性是对发动机进行隐身设计与反隐身探测的重要依据。首先, 针对发动机高温部件及燃气温度范围宽、梯度大而超出红外热像仪响应范围的问题, 提出了多积分时间组合测试方法, 实现了不失真测试; 其次, 通过多帧时间平均方法分析了各积分时间对应的测温范围, 并采用逐像素辐亮度值替代方法, 获得了代表发动机全部辐射信息的合成图像; 最后, 根据合成图像计算了发动机红外辐射强度, 并与相同测点的红外光谱辐射仪测试结果进行对比, 最大误差不超过 10%。结果表明: 基于红外热像仪的多积分时间组合测试方法及其数据处理方法是合理有效的。

关键词: 航空喷气发动机; 红外辐射成像测试; 红外辐射特性; 红外隐身; 红外热像仪

中图分类号: V218 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)03-0727-05

IR radiation imaging test, process and evaluation of jet aero-engine

Chen Shiguo, Jiang Yong, Fang Haobai, Li Zu

(Science and Technology Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The infrared(IR) signature is the important basis for IR stealth design and anti-stealth detection of jet aero-engine. There were three major contributions in this paper. Firstly, the jet aero-engine had a wide temperature span to be measured, which was far too large for an IR camera to cover in one snapshot. This was accomplished by using multi-integral time combined measure method, each integral time was optimized to a definite range of temperature and to make sure that the combination of all integral times seamlessly covered the entire temperature range of target. Secondly, the measured temperature range of each integral time was defined by multi-frame image time-averaging method, then a per-pixel radiance replacement and images synthesization method was proposed to form an integrated IR image. Compared with IR image of single integral time, the integrated image shows abundant target details and signature information. Finally, the distribution of IR radiant intensity was calculated, compared with IR spectroradiometer measurement at the same test-point, and error was less than 10%. The result shows that proposed methods based on IR camera are all reasonable and efficient.

Key words: jet aero-engine; IR radiation imaging test; IR radiation signature; IR stealth; IR camera

收稿日期: 2013-07-12; 修訂日期: 2013-08-16

基金项目: 国防预研项目(51301XX); 国家自然科学基金(61172083); 横向合作项目(3058201121001)

作者简介: 陈世国(1980-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事飞行器红外特性与隐身/反隐身方面的研究。Email: chenshiguocsg@126.com

导师简介: 李应红(1963-), 男, 教授, 中科院院士, 博士生导师, 主要从事等离子体流动控制、激光冲击强化与反导方面的研究。

0 引言

航空喷气发动机是作战飞机的主要辐射源,是红外精确制导武器系统探测和攻击的主要目标。隐身飞机设计中,发动机红外隐身是重点和难点。研究清楚喷气发动机红外辐射特征对于飞机红外隐身设计、反隐身探测、红外隐身技术攻关以及红外导引头设计等均具有重要意义^[1]。

国外在该领域发展较早,手段方法成熟,已有多款具备红外隐身能力的作战飞机问世^[2~4]。国内大量研究集中在建模仿真方面^[5~7],试验研究则以模型发动机为主^[8],极少有条件开展实际喷气发动机整机红外辐射的试验研究。其次,红外测试主要使用红外光谱辐射仪获取所需波段的辐射值^[9],红外热像仪则较少。然而,红外成像测试具有直观性好、细节丰富、易于识别目标与背景等优点,使用红外热像仪测量目标红外辐射特征逐渐成为热点,与红外成像探测制导技术发展趋势吻合^[10]。但喷气发动机高温部件及喷流温度分布从略高于大气温度到1600 K,这就要求热像仪的动态响应范围必须很宽,否则所测图像很难包含目标全部信息,为此,针对该类温度范围宽、梯度大目标,需要研究解决基于红外热像仪的不失真测试方法及数据处理方法。

文中利用红外热像仪同时刻可设置多个积分时间的功能,共使用4个积分时间在4个方位角上测试某型喷气发动机红外辐射特征。研究提出了逐像素辐亮度值替代-图像合成方法,得到了包含目标全部信息的合成辐射图像,根据合成图像数据计算了红外辐射强度,并与红外光谱辐射仪的测试结果进行对比。结果表明:红外热像仪能够较好地用于喷气发动机红外测试。

1 红外成像测试

文中以某型喷气发动机为研究对象,使用红外光谱辐射仪和红外热像仪测试其在“最大连续状态”、“中间状态”下0~90°方位角内中波(3~5 μm)红外辐射强度的分布规律。

为降低背景辐射和大气辐射的影响,测试安排在夜间进行。

1.1 试验系统

试验系统主要由发动机外场试车台、红外测试

仪器、标准面源黑体等组成。

发动机外场试车台为某型喷气发动机提供外场试验平台,由移动式台架、供油供电系统、测控车、辐射遮蔽装置等组成,其特点是可移动,油、电自供给,可使试验不受时间、空间限制。移动式台架通过钢丝绳与地锚联接,用于安装固定待试发动机;供油供电系统为发动机提供航空煤油,并为测控设备提供电力;测控车内包含发动机电动油门、参数测量系统以及发动机控制台等,实现发动机控制及试车参数采集等功能;辐射遮蔽装置主要用于遮挡发动机机身外壁面辐射,使得发动机辐射与“装机状态”时一致。

发动机红外辐射成像测试采用美国 FLIR 公司的中波热像仪 SC7300M,探测器为斯特林制冷的焦平面阵列 MCT,像素 320×256,波段 3.7~4.8 μm,视场角 22°×17°,帧频 230 Hz~23 kHz,测温范围 -20~1500 °C。

发动机红外辐射光谱测试采用加拿大 Bomem 公司的红外光谱辐射仪 MR254,光谱分辨率为 1、4、8、16 cm⁻¹,波段 0.67~14.29 μm,镜头 5、28、75 mrad。

红外测试仪器的现场校准采用美国 SBIR 公司的标准面源黑体 11304,发射率为 0.93,孔径为 100 mm×100 mm,可调温度范围 50~600 °C,该黑体已在国防一级标准“50~1000 °C 标准黑体辐射源”上标定。

1.2 测点布局

发动机红外辐射由高温部件及尾喷流产生,喷流在尾向呈长条状扩散。受仪器视场限制,若将喷流全部置于视场内,则仪器需布置在较远处,此时大气衰减明显,仪器信噪比显著降低;且占主要辐射份额的高温部件和尾喷流核心区的空间分辨率变差,极易产生较大的数据处理误差。因此,确定测点布局应综合考虑目标辐射范围、测试精度、数据处理、人员设备安全等,图 1 给出了文中采用的测点布局。

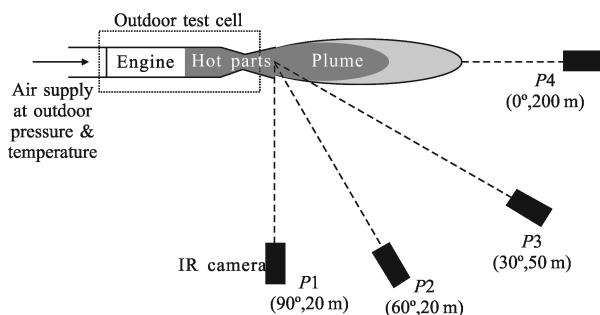


图 1 发动机及热像仪测点布局

Fig.1 Configuration of turbofan-engine and IR camera

1.3 多积分时间组合测试

红外成像原理是目标辐射能量经光学系统在焦平面汇聚,焦平面各单元探测器将接收的辐射能量转换成电信号,再经颜色映射处理,由显示器将电信号转换为二维伪彩色图像。

与热电偶测温类似,红外探测器对辐射能量(温度)响应范围也是确定的,过多会饱和,过少会截止,差别在于探测器接收的辐射能量是随时间累积的,定义辐射能量在探测器上的累积时间为积分时间(Integral Time, IT)。因此,一般有两种途径实现对宽范围温度测量,一是改变滤镜,即通过滤镜衰减辐射能量使之刚好处于探测器响应范围内,不同滤镜衰减能力不同,由仪器厂商提供;二是调整积分时间,即通过改变单位时间内探测器接收的辐射能量使之适应不同的测温需要,该方法用户可根据需要设置。

实际喷气发动机红外辐射的特点是温度动态范围很宽(约常温~1 600 K)、局部温度梯度很大,所对应的辐射能量范围也较宽。对于此类目标,因任一滤镜所对应的测温范围均难以覆盖全部目标温度范围,导致红外热像仪往往测不准。为此,文中研究提出了“多积分时间组合测试”方法,由不同的积分时间负责测试不同温度范围内目标辐射能量,多个积分时间组合起来就足以覆盖目标全部温度范围,从而实现不失真测试。

红外热像仪的辐射响应输出用数字电平 DL(Digital Level)表示,DL 的取值范围是确定的,其值大小取决于积分时间 IT 内接收到的光子个数及其能量。若达到相同数字电平所需的积分时间越少,说明单位时间内目标辐射的光子个数越多、能量越大,目标温度越高,反之亦然。

文中将 SC7300M 的滤镜设为“open”方式,取 4 个积分时间组合测试,积分时间由大到小表示为 IT1、IT2、IT3、IT4。此次试验完成了图 1 所示 4 个测点的发动机红外辐射成像测试,IT1~IT4 分别为 1 042 μs、400 μs、150 μs、40 μs。待发动机稳定工作 2 min 后保持,每个积分时间以 50 帧/s 的速度共采集至少 20 s, 图 2 给出了 P1 测点 IT1~IT4 中任意一帧图像。为便于研究,以下均以 P1 测点数据为例进行处理。

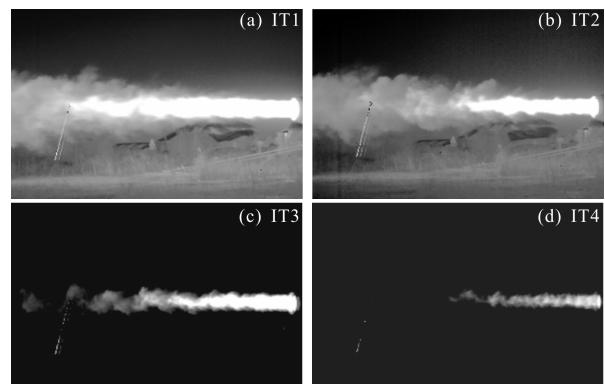


图 2 P1 测点不同积分时间任意帧红外图像

Fig.2 IR images of random frame in different IT at P1

2 数据分析处理

2.1 数据有效性分析

如图 2 所示,单帧图像轮廓边界不规则,气流脉动剧烈,图像的随机性非常明显,无法直接进行测试数据有效性分析。图 3 是将 P1 测点发动机“中间状态”时采集的 1 092 帧经时间平均后的红外图像,该方法消除了气流脉动等影响;图 4 则给出了 IT1~IT4

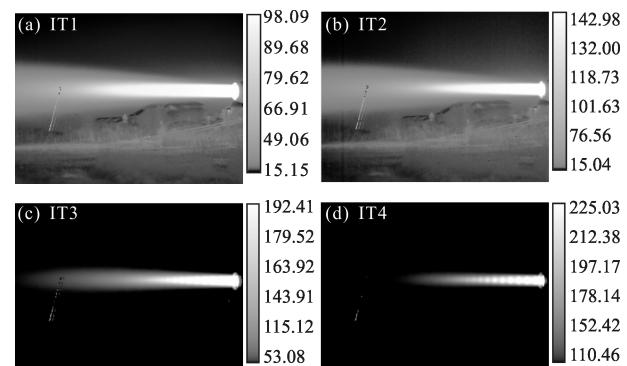


图 3 时间平均后 P1 测点不同积分时间红外热像对比

Fig.3 Comparison of IR images by time-average in different IT at P1

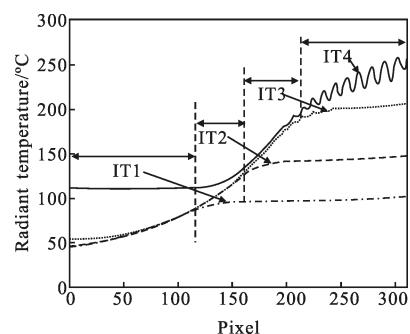


图 4 不同积分时间下发动机轴线上辐射温度分布

Fig.4 Radiant temperature distribution along engine axis in different IT

对应的发动机轴线上辐射温度的分布情况，纵坐标为辐射温度，横坐标为像素点。

可以看出，从 IT1~IT4：(1) 低温背景逐渐消失，目标高温区逐渐清晰，图 3(d)所示的波系结构与图4中辐射温度曲线的“波纹”吻合很好；(2) 每幅图像均有不同程度的饱和现象；(3) 测温范围互补，可以得到目标全部温度信息。因此，多积分时间组合测试方法是合理可行的，采集的原始数据有效。

2.2 逐像素辐亮度替代与图像合成

根据 2.1，由于采用 4 个不同的积分时间，因此，视场内每个像素点会有 4 个不同的辐亮度(辐射温度、DL)，但仅有一个值是有效的，为此，必须确定其合理取值。

再根据 1.3 的分析：热像仪的 DL 由探测器性能决定，取值范围是不变的；而辐亮度和辐射温度则与目标辐射能量有关，其取值范围并不恒定，即不同的辐亮度(辐射温度)可对应同一个 DL，当 IT 改变时，表示该像素点对应的目标辐亮度(或辐射温度)发生了改变。因此，目标辐亮度(或辐射温度)是否处于 DL 的取值范围也可作为数据有效性的判断依据。

基于上述原理，文中提出了逐像素辐亮度替代与图像合成方法进行数据处理，算法流程如图 5 所示，其中 SC7300M 给定的数字电平 DL 的取值范围

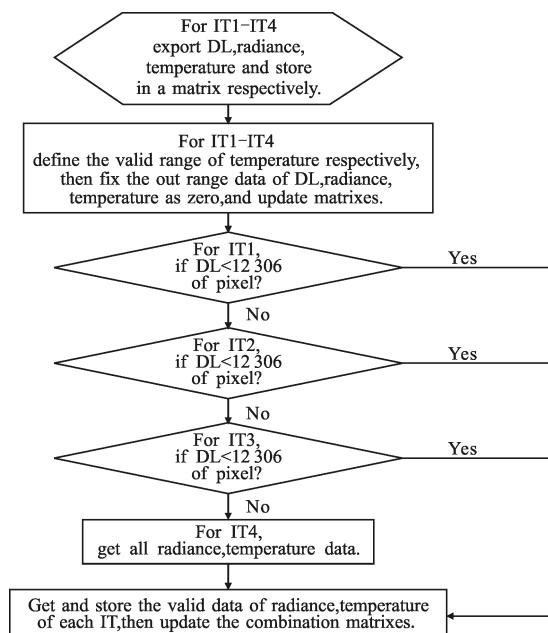


图 5 逐像素辐亮度替代与图像合成算法流程图

Fig.5 Flow chart of per-pixel radiance replacement and images synthesis

是 1180~12306，该算法核心思想是分析确定每个像素点的合理的辐亮度取值，直接消除扣除背景辐射的影响，然后合成为一幅红外图像，该合成图像就包含了目标全部信息。

合成的红外图像如图 6 所示。

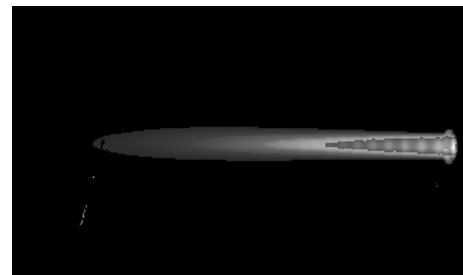


图 6 合成的红外图像

Fig.6 Combined IR image

与图 3 相比，图 6 包含了目标高、中、低温全部信息，层次分明，细节丰富，且高温区波系结构比图 3(d)更清晰，由此可见，该数据处理方法是合理可行的。

2.3 红外辐射强度计算

从理论上讲，红外热像仪与红外光谱辐射仪的辐射测试原理相同，对光谱辐射仪的单元探测器进行空间离散后就是热像仪焦平面阵列，因此，利用红外成像测试数据也可推算出目标的红外辐射强度，其差别在于红外热像仪的光谱范围是固定的，而光谱辐射仪则可通过积分得到响应波段内任意范围光谱辐射强度。

通过提取图 6 合成红外图像中的逐像素辐亮度 L_{ij} ，再结合热像仪视场角、测点距离等参数计算出瞬时视场对应的目标面积 ΔA_{ij} ，利用公式(1)计算了 4 个测点的红外辐射强度。

$$I = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m L_{ij} \Delta A_{ij} \quad (1)$$

计算结果如表 1 所示，其不确定度主要考虑辐射校准、目标面积、大气修正等因素，约为 15%。

表 1 热像仪与光谱仪红外辐射强度对比
(3.7~4.8 μm)

Tab.1 Comparison of IR radiant intensity of spectrometer and camera between 3.7 and 4.8 μm

Azimuth	Test point	SC7300M	MR254	Error
90°	P1	0.105	0.096	-9.7%
60°	P2	0.158	0.146	-8.4%
30°	P3	0.334	0.353	5.3%
0°	P4	0.954	1.000	4.6%

3 结果验证

为验证文中提出的测试方法及数据处理方法,采用红外光谱辐射仪在相同波段的积分辐射强度进行对比分析。

此次试验时,在图1四个测点同时布置了傅立叶变换式红外光谱辐射仪MR254进行了测试,MR254与SC7300M在实验室、现场均采用相同黑体进行校准。MR254数据采集过程稳定,结果可靠,数据处理采用仪器内置分析软件。

MR254与SC7300M分别得到4个测点的归一化红外辐射强度数据,如表1所示。

由表1可以看出,二者总体上吻合很好,最大偏差不超过10%;随着方位角增加,热像仪所得值大于光谱辐射仪,二者偏差也增大,这是因为方位角较大时,目标辐射能量降低,光谱辐射计信噪比下降,测试精度随之下降,而此时红外热像仪几乎不受影响,因而结果更可信。

4 结论

(1) 针对喷气发动机排气系统等温度动态范围宽、梯度大目标,采用多积分时间组合测试方法,红外热像仪能够实现不失真测试。

(2) 采用多帧热像时间平均处理方法,可有效去除目标红外辐射特征的波动现象。

(3) 逐像素辐亮度替代与图像合成方法,对多积分时间组合测试得到的红外热像进行处理是合理可行的,可以得到信息更全面、精度更高的合成图像和辐射强度数据。

(4) 合理的积分时间组合对于红外热像仪实现精确测试至关重要。

(5) 方位角较大时,与光谱辐射计相比,红外热像仪的测试结果可信度更高。

参考文献:

- [1] Sang Jianhua, Zhang Zongbin. Development trends of infrared stealth technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 14–19. (in Chinese)
桑建华, 张宗斌. 红外隐身技术发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 14–19.
- [2] Division P W A. Turbine engine infrared signature program [R]. AD-A028659, 1976.
- [3] George W, G Warren E, Donald S, et al. IR field measurements from the FISTA aircraft; calibration, data reduction, and development of IR signature models[R]. AD-A394460, 1999.
- [4] Morris T A. Analysis of uncertainties in infrared camera measurements of a jet aero-engine in an altitude test cell[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 48(2): 130–153.
- [5] Liu Youhong, Shao Wanren, Zhang Jinxiu, et al. Numerical simulation of flow field and infrared characteristics of an aero-engine exhaust system and its plume [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(3): 591–597. (in Chinese)
刘友宏, 邵万仁, 张锦绣, 等. 发动机排气系统及尾喷流的流场和红外特征数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 591–597.
- [6] Liu Juan, Gong Guanghong, Han Liang, et al. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209–1213. (in Chinese)
刘娟, 龚光红, 韩亮, 等. 飞机红外辐射特性建模与仿真 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1209–1213.
- [7] Mei Fei, Jiang Yong, Chen Shiguo, et al. Infrared imaging prediction model for aero-engine exhaust plume[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(8): 909–913. (in Chinese)
梅飞, 江勇, 陈世国, 等. 一种航空发动机喷流红外成像仿真模型 [J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 909–913.
- [8] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Shao Wanren, et al. Experiments on infrared radiation characteristics of exhaust system for a jet aero-engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(10): 2228–2234. (in Chinese)
单勇, 张靖周, 邵万仁, 等. 某型涡扇排气系统缩比模型红外辐射特征实验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2228–2234.
- [9] Luo Mingdong, Ji Honghu, Huang Wei, et al. Experiment on spectral infrared radiation characteristics of exhaust jet from 2D nozzle of jet aero-engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(2): 152–156. (in Chinese)
罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 二元喷管热喷流的红外光谱辐射特性实验 [J]. 推进技术, 2007, 28(2): 152–156.
- [10] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Evelopment trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145–3153. (in Chinese)
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145–3153.