

文章编号:1001-5078(2019)10-1223-05

· 红外技术及应用 ·

航空发动机红外辐射特性测试评估技术

许帆,姚凯凯,张锐娟,王浩
(中国飞行试验研究院,陕西西安710089)

摘要:航空发动机红外辐射特性测试研究对飞机、发动机红外隐身设计与改进具有非常重要的意义。针对发动机红外辐射特性的测试需求,从试验平台、测试系统、测试方法、误差控制四个方面提出了以发动机试车台为试验平台的红外辐射特性测试方案,开展了某型发动机红外辐射特性测试,获取了有效数据。通过数据处理与评估,结果表明:发动机红外辐射特性具有明显的方向性。

关键词:航空发动机;红外隐身;红外辐射特性测试;发动机试车台;评估

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.10.013

Infrared radiation characteristic testing and evaluating technology of aero-engine

XU Fan, YAO Kaikai, ZHANG Rui-juan, WANG Hao
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: The infrared radiation characteristic testing research of aero-engine is the significant basis for infrared stealth design and improvement of plane and aero-engine. According to the requirement of infrared radiation characteristic testing, the project on the aero-engine test bed was proposed from four aspects such as platform, testing system, testing method and error control. The infrared radiation characteristic testing of aero-engine was carried out and the available data were acquired as this project. Through data processing and evaluating, the results shows that aero-engine infrared radiation characteristic is directional.

Keywords: aero-engine; infrared stealth; infrared radiation characteristic testing; aero-engine test bed; evaluating

1 引言

飞机的红外辐射特征主要由飞机蒙皮、尾喷管、尾焰以及其他高温部件的红外辐射决定。其中飞机蒙皮的红外辐射包括其自身辐射以及对背景、大气等其他辐射源的反射,主要集中在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段;尾喷管、尾焰及相关高温部件的红外辐射为排气系统的红外辐射,主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段^[1],是作战飞机后半球的主要辐射源。因此,研究发动机排气系统的红外辐射特性对发动机红外隐身设计、改

进具有重要的意义^[2-3]。

鉴于发动机红外辐射特性的重要意义,国内许多科研单位都开展了相关研究。李建勋、童中翔等^[4]为研究航空发动机红外辐射特征,以发动机移动试车台为试验平台,进行了某型发动机红外辐射特性测试实验与仿真;陈世国、江勇等^[5]针对发动机高温部件及燃气温度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,并进行了验证;关玉波、尚守堂等^[6]提出了一种发动机整机红

作者简介:许帆(1993-),男,助理工程师,硕士研究生,主要从事红外目标特性测试与分析技术等方面的研究。
E-mail:824782372@qq.com

收稿日期:2019-03-19

外辐射特性地面测试方案;王超哲、童中翔^[7]研究表明发动机红外辐射强度与探测角度密切相关。此外,李建勋等^[8]在建模仿真方面都相继开展了研究。

本文从试验平台、测试系统、测试方法、误差控制四个方面提出了以发动机试车台为试验平台的红外辐射特性测试方案,并开展了某型发动机红外辐射特性测试,获取了有效数据,研究了红外辐射特征分布,为后续发动机红外特性研究和型号鉴定提供了技术支持。

2 测试方案

2.1 试验平台

航空发动机红外辐射特性测试方法包括空空编队测试和地面测试两种。空空测试目前采用载机安装红外测量吊舱,将目标飞机、发动机作为一个整体进行红外辐射特性测试;地面测试包括飞机发动机地面开车、移动试车台和露天试车台三种方式。

通常采用空空编队测试的方法进行飞机整机红外辐射特性测试及评估,由于此方法将飞机和发动机作为一个整体进行红外辐射特性测试,随着探测角度逐渐远离正尾后,飞机蒙皮及其他发热部件的影响增大,甚至存在机体遮挡尾焰和尾喷管的现象,影响测试精度;同时空空测试耗费资源多、潜在风险高于地面测试。前两种地面测试方式限制因素较多,例如发动机连续开车时间较短、发动机大状态下测试平台的地面系留问题以及测试平台高度低导致地面能量辐射进入红外测试仪器视场影响测试精度。因此,发动机安装在露天试车台上进行红外辐射特性测试是一种较为合理的测试方法。

2.2 测试系统

航空发动机红外辐射特性测试系统由中/长波红外热像仪、红外光谱辐射计以及一套黑体标校系统组成。通过红外热像仪,不仅能够获取 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 9.4\mu\text{m}$ 波段目标的红外辐射亮度、红外辐射强度以及红外热图像,而且可以借助红外热图像实时观察发动机排气系统状态是否稳定,辅助红外辐射特性测试的数据采集工作;红外光谱辐射计,能够给出目标红外辐射强度在 $1.3\sim 14.1\mu\text{m}$ 的光谱分布曲线,同时能够通过积分的方式得出 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 10\mu\text{m}$ 等不同波段的辐射强度;由于目标和红外测试仪器之间存在大气吸收和粒子散射等大气衰减

现象,使被测目标的辐射能量不能全部到达红外测试设备,因此为保证测试数据的准确性和稳定性,现场需要黑体标校系统在试验前后对红外测试仪器进行校准。

2.3 测试方法

航空发动机整机红外辐射特性测试的目标主要包括发动机尾喷口和尾焰,目标尺寸和红外特性随方位角的变化而不同;方位角 0° (正尾后)时目标尺寸最小,随着方位角逐渐增大,发动机尾焰将逐渐在视场内增大,方位角 90° (正侧向)时尺寸最大。为了全面评估发动机的红外辐射特性,测试方法如下:

a) 红外测试共选取11个角度,如图1所示分布于发动机轴线延长线一侧,包括 0° 、 2.5° 、 5° 、 7.5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 30° 、 40° 、 60° 、 90° ;测试距离由目标尺寸、测试仪器视场大小以及测试人员安全综合确定。其中 $0^\circ\sim 5^\circ$ 需结合发动机推力和测试仪器视场大小确定测点距离,既要保证不危及测试人员和设备安全,又要使目标成像尺寸满足红外测试要求; $7.5^\circ\sim 90^\circ$ 需结合目标尺寸和测试仪器视场大小确定测点距离,使目标成像尺寸满足红外测试要求,具体结果如表1所示。采用全站仪对11个测点位置进行精确定位;红外测试仪器置于专用台架上进行测试,使测试仪器和发动机喷口接近同一高度,保证测试设备俯仰角在 $(0^\circ\pm 1^\circ)$ 内。

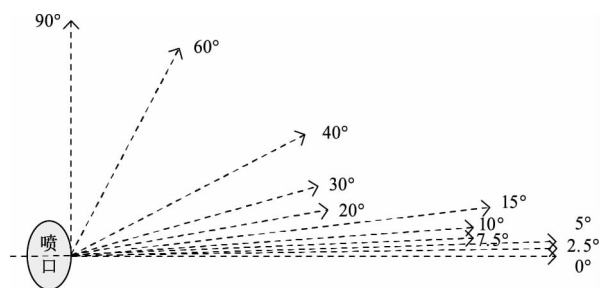


图1 测点分布

Fig. 1 location distribution

表1 测点距离

Tab. 1 Distance of measurement location

方位角/ $(^\circ)$	0	2.5	5	7.5
距离/m	300	300	300	240
方位角/ $(^\circ)$	10	15	20	30
距离/m	240	255	140	140
方位角/ $(^\circ)$	40	60	90	
距离/m	140	140	140	

b) 红外测试易受背景干扰和环境温度变化的影响,比如阳光反射或照射,因此选择无雨凌晨进行试验。该时间段环境温度稳定,可以减小环境温度变化带来的测试误差。

c) 试验正式启动前,执行发动机开车检查程序,进行发动机工作参数、工作稳定性、加减速性能等检查工作,确认发动机达到标准技术状态。

d) 采用遮挡板对发动机试车台架、发动机机身以及周围建筑物等辐射源进行遮挡,保证视场内背景的均匀一致性,提高测试精度。

e) 针对发动机的典型工作状态(中间状态、最大连续状态)进行红外辐射特性测试;测试过程中发动机各工作状态下保持不小于 3 min;通过红外热像仪观察尾焰核心区温度,稳定保持在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内,再进行红外辐射数据采集工作,记录时间不小于 30 s。

f) 试验前后,需要对红外测试设备进行现场校准和检查;对大气环境、试验背景测试。

2.4 误差控制

a) 采用遮挡板对发动机试车台架、发动机机身以及周围建筑物进行遮挡,保证视场内背景的一致性,提高测试精度;其中遮挡板采用高比热容的非金属材料制成,外表面涂覆低红外反射率涂料。

b) 采用全站仪对 11 个测点位置进行精确定位,减少红外辐射强度计算时的累积误差。

c) 红外测试仪器置于专用台架上进行测试,使测试仪器和发动机喷口接近同一高度,避免大俯仰角带来的测试误差。

d) 待发动机各工作状态稳定后,再进行红外辐射数据采集工作,避免发动机状态波动带来的测试误差。

f) 选择凌晨进行红外特性测试,并且记录大气环境和试验背景数据,对当天测试结果进行修正,减小大气环境变化带来的测试误差。

3 数据处理

3.1 红外热像仪

红外热像仪通过红外探测器接收被测目标的红外辐射能量分布并反映到红外探测器的光敏元件上,形成红外热图像^[6],以及目标的辐射亮度分布。通过热像仪的瞬时视场和测点距离可以得到目标红外热图像中单个像素点对应的目标面积,结合辐射

亮度可以计算得出被测目标的红外辐射强度,公式如下:

$$I = \varepsilon \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m L_{ij} (d \cdot \theta)^2 \quad (1)$$

式中, θ 是热像仪的瞬时视场,单位 rad; d 是测点距离,单位 m; L_{ij} 是目标像素点 (i, j) 处的辐射亮度; ε 是修正系数,由大气透过率和现场黑体标校系统综合给出。

3.2 光谱辐射计

光谱辐射计将视场内所有目标场景的入射能量通过光电转换成为电信号,获得目标场景的输出电压,通过黑体标校系统对辐射计定标,确定光谱辐射计的亮度响应度,利用亮度响应度,计算出目标场景的辐射亮度。在进行光谱数据处理时,还需考虑背景辐射影响,并将其扣除,进而得到目标的光谱辐射亮度及光谱分布,公式如下:

$$R_L = \frac{V_1 - V_2}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} [L_{bb\lambda}(T_1) - L_{bb\lambda}(T_2)] \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot r_d(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, R_L 是辐射计的亮度响应度; V_1, V_2 分别是对温度 T_1, T_2 的黑体测量时辐射计输出的电压,单位 V; $L_{bb\lambda}(T_1)$ 是温度 T_1 的黑体光谱辐射亮度,单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; $L_{bb\lambda}(T_2)$ 是温度 T_2 的黑体光谱辐射亮度,单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; $\tau_a(\lambda)$ 是大气透过率; $\tau_0(\lambda)$ 是光学系统的光谱透射率透过率; $r_d(\lambda)$ 是探测器的相对光谱响应。由公式(2)进而得到波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 目标的辐射亮度 L ,公式如下:

$$L = \frac{V_{tb} - V_{tg}}{R_L} \quad (3)$$

式中, V_{tb} 是目标加背景时辐射计输出的电压值,单位 V; V_{tg} 是测量背景时辐射计输出的电压值,单位 V。将辐射亮度 L 带入公式(4),即可得到波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 目标的辐射强度,公式如下:

$$I = (d \cdot \theta)^2 L \quad (4)$$

式中, θ 是光谱辐射计的瞬时视场,单位 rad; d 是测点距离,单位 m。

3.3 测试结果

按照上述测试方案,开展了某型发动机红外辐射特性测试。通过中波(3 ~ 5 μm)/长波(8 ~ 9.4 μm)红外热像仪分别获得了不同观测角度下,发动机最大连续状态和中间状态的红外辐射强度,

如图2所示。同时也利用光谱辐射计得到了红外辐射强度的光谱分布曲线,通过积分的方式得出不同观测角度下中波(3~5 μm)、长波(8~14 μm)的红外辐射强度,如图3所示。为了验证红外热像仪和光谱辐射计测试结果的一致性,采用光谱辐射计在3~5 μm 的积分辐射强度与红外热像仪测得的中波红外辐射强度(中间状态)进行对比,结果如图4所示,测试结果具有一致性,平均偏差不超过8.5%,该偏差由背景剔除误差、热像仪和光谱辐射计的视向角偏差等造成。

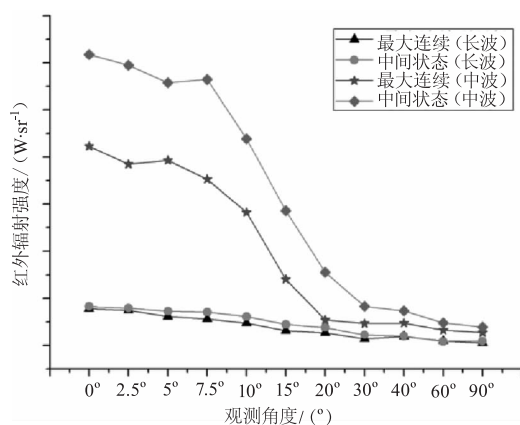


图2 红外热像仪

Fig. 2 Thermal infrared imager

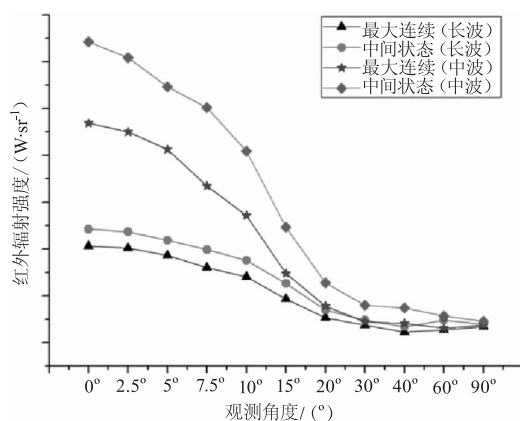
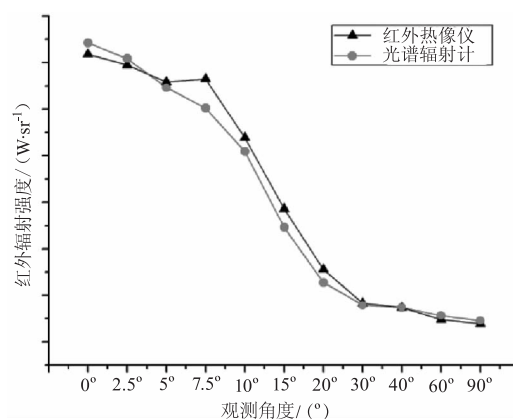


图3 光谱辐射计

Fig. 3 Spectral radiometer

结果表明:发动机中波红外辐射强度明显高于长波红外辐射强度,且中间状态的红外辐射强度高于最大连续状态下的红外辐射强度。发动机红外辐射特性具有明显的方向性:观测角度在0°~7.5°时,涡轮、尾喷口、尾焰共同向红外探测器辐射能量,是红外特征最明显的观测区域,红外辐射强度明显大于其他观测角度下的红外辐射强度,所以是红外制导弹攻击的优势区域;观测角度从7.5°逐渐增

大至30°,尾焰面积随之增加,涡轮和喷口的辐射面积逐渐减小,红外辐射强度迅速降低;30°~90°时,红外辐射强度随观测角度的增加逐渐变小,变化趋势趋于平缓;90°时涡轮和喷口完全消失,尾焰面积达到最大,此时红外辐射强度最小。

图4 红外热像仪和光谱辐射计红外辐射强度对比3~5 μm Fig. 4 Comparison of thermal infrared imager and spectral radiometer between 3 μm and 5 μm

4 结论

发动机红外辐射特性测试是一项复杂的测试工程,涉及试验平台、测试系统、测试方法、误差控制、资源协调、气象环境等方面内容,尤其是误差控制密切影响测试精度。本文提出的测试方法综合考虑了测试背景、大气环境、测试仪器、测试过程等方面带来的测试误差,并采取了相应的措施;基于此,开展了某型发动机红外辐射特性测试评估工作,掌握了红外辐射特征分布,积累了测试经验,为后续发动机红外特性研究和型号鉴定奠定了基础。

参考文献:

- [1] SONG Xinbo, LU Xueyan, ZHANG Jianjun, et al. Study on the infrared stealth technology of plane [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 3-7. (in Chinese)
宋新波, 吕雪艳, 章建军. 飞机红外隐身技术研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 3-7.
- [2] DENG Hongwei, ZHAO Chunsheng, JIA Dongbin, et al. Analysis of stealthy shape design technology for aero-engine exhaust nozzle [J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 10-14. (in Chinese)
邓洪伟, 赵春生, 贾东兵, 等. 航空发动机喷管隐身修形设计技术分析 [J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 10-14.

- [3] DENG Hongwei, SHANG Shoutang, SHAO Wanren, et al. Investigation on infrared stealth technology based on after-burning cone cooling[J]. Aeroengine, 2011, 37(2): 12 – 15. (in Chinese)
邓洪伟, 尚守堂, 邵万仁, 等. 基于加力内锥冷却的红外隐身技术研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(2): 12 – 15.
- [4] LI Jianxun, TONG Zhongxiang, LIU Wanjun, et al. Infrared radiation characteristic experiment and simulation of aeroengine[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 549 – 555. (in Chinese)
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 – 555.
- [5] CHEN Shiguo, JIANG Yong, FANG Haobai, et al. IR radiation imaging test, process and evaluation of jet aero-engine[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 727 – 731. (in Chinese)
陈世国, 江勇, 方浩百, 等. 喷气发动机红外辐射成像测试、处理与评估[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 727 – 731.
- [6] GUAN Yubo, SHANG Shoutang, WANG Dongming, et al. Research on the infrared radiation tests method for aero engine[J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33: 102 – 105. (in Chinese)
关玉波, 尚守堂, 王东明, 等. 发动机整机红外辐射特性测试方案研究[J]. 测控技术, 2014, 33: 102 – 105.
- [7] WANG Chaozhe, TONG Zhongxiang, LU Yanlong, et al. Study on the airplane's infrared radiation characteristics[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 998 – 999. (in Chinese)
王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 998 – 999.
- [8] LI Jianxun, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, et al. IR radiation characteristics analysis and vulnerability assessment of aircraft[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 180 – 185. (in Chinese)
李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 飞机红外辐射特性分析与易损性评估[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 180 – 185.