

文章编号:1001-5078(2024)01-0078-06

· 红外技术及应用 ·

航空发动机台架红外辐射特性测试技术研究

丁旭,王浩,宋江涛,金利强,高非凡
(中国航空工业集团公司中国飞行试验研究院,陕西西安710089)

摘要:航空发动机作为航天航空飞行器的高温核心部件,贡献了整个飞行器的红外辐射强度,其中 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中波段、以及 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的长波段是主要辐射波段,基于其红外辐射强度测定分析的重要意义,同时基于GJB-241中关于红外辐射特性测试鉴定需求,考虑到环境、气象、测试设备等因素的影响,建立了一套能应用于航空发动机台架整机红外辐射特性测试试验方法,并应用于某发动机测试试验,试验结果表明,提出的测试试验方法能够满足该发动机红外辐射测试需求,获取了该发动机不同波段下典型的红外光谱曲线,获取了相关测试经验,为后续研究积累了一定基础。

关键词:航空发动机;红外辐射;试验技术;台架;方位角

中图分类号:TN219;TN970 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.01.011

Research on infrared radiation characteristics testing technology of aircraft engine bench

DING Xu, WANG Hao, SONG Jiang-tao, JIN Li-qiang, GAO Fei-fan
(Aviation Industry Corporation of China, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: As the key high-temperature component of aerospace vehicles, aero-engine contributes to the infrared radiation intensity of the entire aircraft, of which the mid-wavelength band of $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and the long-wavelength band of $8\sim 14\ \mu\text{m}$ are the main radiation wave bands. Considering the significance of the infrared radiation intensity measurement and analysis, and based on the requirements of GJB-241 for infrared radiation characteristic test and identification, the establishment of a set of infrared radiation characteristics test methods taking into account the environment, meteorology, test equipment and other factors that can be applied to aero-engine racks and an engine test. The test results show that the proposed test method can meet the infrared radiation test requirements of this engine, obtain the typical infrared spectrum curves of the engine at different wavelengths, accumulate the relevant test experience of the model, and lay a certain foundation for the subsequent research.

Keywords: aircraft engine; infrared radiation; test technology; aeroengine bench; azimuth angle

1 引言

随着红外以及雷达探测技术发展,航空飞行器正受着越来越多的红外制导以及光电制导导弹威胁,因此,减少飞行器对外的红外辐射,提升其隐身性能,可以大大提高军用飞行器生存能力,对未来战

机的影响具有重要意义^[1-2]。一般来说,航空飞行器主要包含雷达以及红外隐身,其中红外隐身在国内外相关研究中是一个重要的方面^[3-4]。作为航空飞行器的关键高温部件(如图1所示),对航空发动机整机红外辐射特性进行了测试鉴定,从而改善其

红外隐身设计,对于航空装备研制鉴定以及性能提升具有深远意义。



图1 红外辐射主要来源

Fig. 1 The main source of infrared radiation

目前,国内外均已开展了相关的研究工作。西方军事强国早在上个世纪八十年代已经系统性地开展了相关研究性工作,国外相关技术成果也均由欧美各大研究所掌握,McGlynn^[5]等,通过一系列的模拟计算软件,如 NTCS, NIRATAM 等,完善航空发动机红外辐射计算模型以及算法,使航空发动机红外辐射强度模拟计算精度得以提高。北约组织 NATO^[6],多国进行合作,提出了一种用于能够用于固定翼飞行器反导武器的计算方法^[7-10],从辐射理论研究,扩展到外场测试技术,实现了红外辐射特性方法计算实施。近些年,越来越多的西方国家投入人力、物力参与到航空发动机红外辐射特性测试研究中去,瑞典国家防护中心^[11]以及法国航空研究中心(ONERA)^[12],甚至印度技术研究所^[13],都开发了相关的计算软件,提出了相关测试计算方法,从而达到对航空发动机红外辐射特性的考核。

国内也开展了一系列的相关研究,李建勋^[4]等,利用移动试车平台,初步实现了某台发动机红外辐射的测定;陈世国^[14]等,通过红外热像仪的不失真技术,提出了一种组合积分形式的测试方法;王超哲^[3]等,根据温度场分布影响红外辐射的有关原理,获取了飞机全机红外辐射计算模型。

目前国内还未有公开文献资料,对航空发动机整机红外辐射特性测试技术进行详细设计,本文通过试验点方位规划、试验台架选择、测试系统以及误差控制等方面提出了一种试验鉴定方法,进行了相关验证试验,验证试验方法可行性。

2 试验要求

一般来说,进行航空发动机的台架整机红外试验,同时基于型号鉴定需求,将发动机进行状态鉴

定,或者将不同改型的发动机进行状态对比,需要将红外辐射特性测试试验放在同一标准条件下进行,所以采用标准的露天试车台作为测试平台,能够最大程度控制试验条件,评估发动机红外辐射特性。其中,GJB241A^[15]中对航空发动机红外辐射特性测量相关条件以及指标进行了明确要求,为了便于试验实施,需要对 GJB 中的指标进行裁剪,测试的一般要求如下:

(1)发动机红外辐射源主要来源于发动机尾喷口、尾焰以及发动机自身高温部分,定义发动机后部中心延长线为发动机 0° 方位角。发动机辐射强度与方位角直接相关,在 0° 方位角条件下,主要由发动机尾喷口贡献红外辐射强度,此时发辐射强度值最大,随着方位角增加发动机红外辐射强度由发动机尾焰贡献,强度逐渐降低,所以,按照 GJB-241A 要求,需要进行各方位角下的不同红外辐射特性测试;

(2)在测试前后,红外测量设备的频谱响应需要用标准的红外辐射源进行校准,一般使用点源或面源黑体作为标准的红外辐射源,来进行测试设备基准校准;

(3)试验时,应避免在白天有阳光的天气,防止阳光辐射对试验结果造成影响,测试期间,并对气象参数进行记录,一般包含风速、风向、温度、气压以及湿度等;

(4)在测试过程中,对发动机和试车平台遮挡,以减少背景辐射带来的误差,使发动机达到“模拟装机”状态;

(5)测试时,应使发动机状态稳定后,开展测量。

3 测试方案

3.1 试验平台

红外测试试验时,需要同时综合考虑发动机结构尺寸、尾喷口大小以及开车时尾焰长度,且发动机在不同工作状态,其尾焰长度不同,为保证试验设备及试验人员的安全,需要留足够的安全距离,仪器视角选择时,应选择与目标大小相匹配的测试仪器。测试仪器随着方位角的增大,需测量的尾焰长度增加,其视角应当增大,测试方位角与视角关系如图 2 所示。

根据测试发动机的红外目标特性(尾喷口大小以及尾焰核心区长度),需要选择合适的仪器镜头,场地规划需考虑 0° 以及 90° 方位角下的测量,在 0° 方位角条件下,测点布置时,需留有足够的距离,防止发动机尾流对人和测试设备造成伤害,在 90° 方位角条件下,尾焰核心区长度最大,需选择较大视场的仪器设备。所以在测试平台选择时,选择空旷的露天试车台,并保证测试视场内水泥地面、草地等干扰背景小,能够满足测试需求。

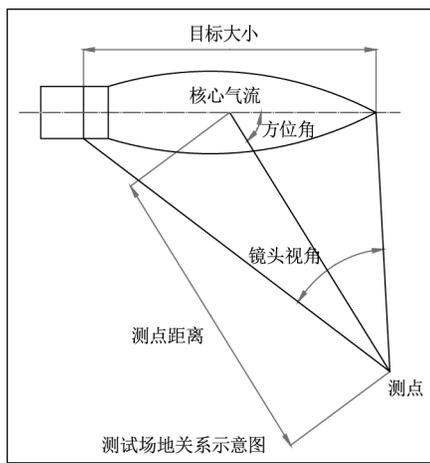


图2 方位角与视角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of azimuth and viewing angle

3.2 试验设备

3.2.1 红外测试设备

红外测试设备主要包括中/长波热像设备、光谱辐射计设备、点/面源黑体校准设备等。通过光谱辐射计试验设备,可以测得航空发动机在 $1.4 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射特性光谱曲线,通过积分获得不同波段的红外辐射强度值用以衡量发动机辐射的强度;通过热像设备,可以获得相应波段的发动机红外辐射强度以及热像图,同时用于实时观测发动机尾流热像特性;由于空气中含有 H_2O 以及 CO_2 等分子的吸收作用,红外辐射能量在传播时存在一定减弱,这样使得目标处的红外辐射强度不能完全传递到测试设备处,为了消除该影响造成的测量误差,在测试红外线测试仪器均采用黑体设备进行现场标校。试验过程中,同时,可以通过气象参数分析或者采用大气透过率测量系统进行大气透过率的分析计算或测量工作。一般常用的光谱辐射计以及红外热像仪设备指标如表1和表2所示。

表1 光谱辐射计主要性能

Tab. 1 Spectral radiometer main performance

参数名称	MR170	SR5000
光谱范围/ μm	2 ~ 14	1.3 ~ 14.1
分辨率/ cm^{-1}	1, 2, 4, 8, 16, 32	典型值为波长的2%
采集方式	全波段采集	分波段采集
采集速率/Hz	107	50
视场角/mrad	4.9; 28; 75	7; 35; 57.5; 70

表2 红外热像仪性能

Tab. 2 Thermal imaging camera performance

参数名称	SC7700 中波	SC7750 长波
波长范围/ μm	3.7 ~ 4.8	8 ~ 9.4
图像大小	640 × 512	640 × 512
测温范围/ $^\circ\text{C}$	5 ~ 2000	-20 ~ 2000
温度测量精度/ $^\circ\text{C}$	± 1	± 1
帧频/Hz	≤ 100	≤ 100
镜头	5.8° × 4.7°; 2.75° × 2.2°; 11° × 8.8°;	11° × 8.8°; 5.8° × 4.7°; 2.75° × 2.2°
工作模式	斯特林循环制冷	斯特林循环制冷

3.2.2 台架配套试验设备

在发动机整机台架红外测试中,对测试平台和发动机本身都进行必须的遮挡,仅将发动机尾喷口露在外面,模拟“装机状态”,可以降低环境因素影响,提高测量精度。遮挡装置内侧(靠近发动机一侧)由防止外部铝板受热而温度升高的岩棉板构成;将漫反射涂层涂刷在挡板外侧的铝板表面,形成一个漫反射的表层,经测量,遮挡板表面发射率为0.937。发动机遮挡装置由发动机试车台架遮挡板和尾喷口遮挡板组成,图3所示为试车台架及被测发动机遮挡前后示意图,图4为遮挡装置现场安装图。

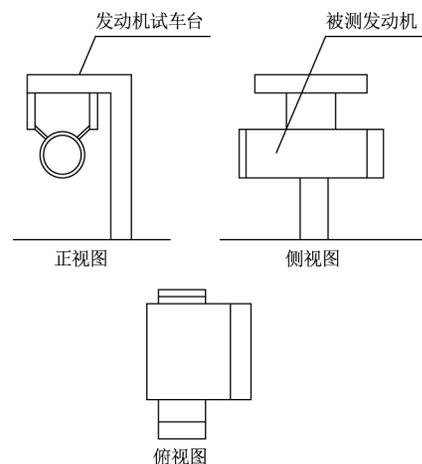


图3 试车台架及被测发动机遮挡前示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test bench and the engine under test before occlusion

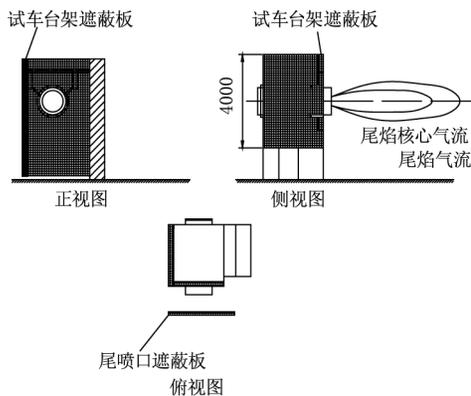


图4 试车台架及被测发动机遮挡前后示意图
Fig.4 Schematic diagram of the test bench and the front and rear occlusion of the engine under test

红外测试平台主要用于安装和移动红外测量设备,可以将红外测试设备的俯仰角调整至 $(0 \pm 0.5)^\circ$ 内。该平台可移动,并配置支撑调平机构。操作平台分两层,安装有专用光学板,用于固定测试用红外测量设备。

3.3 试验方法

3.3.1 红外测试核心区域确定

红外辐射特性测试过程中,主要测试的是发动机尾流区以及发动机机尾喷口区域的红外辐射特性强度。当测试方位角为 0° 时,测试设备视野中为发动机尾喷口,而方位角变大时,尾流在测试仪器中所占视场比重变大,方位角为 90° 时达到最大。所以,正式测试试验前,需要首先确定发动机尾流核心区的长度以及,发动机尾喷口红外辐射直径。

在 90° 方位角下,采用热像仪对尾焰辐射温度进行标定,确定尾焰核心区尾流长度。同样,在 0° 方位角下,以发动机在测试状态下的尾喷口辐射尺寸,作为尾喷口的红外辐射直径。

3.3.2 试验安全距离确定

由于红外测试试验处于发动机尾气流区域内,为了保证红外测量设备和测试人员安全,采用全站仪和手持式风速仪,通过调试试验确定小角度方位角($0 \sim 15^\circ$)下人员和设备可接受的安全测试距离。

3.3.3 测点布置

按照确定的尾焰核心区长度和尾喷口直径,统筹考虑测试场地、测试设备视场、现场测试人员和仪器安全等,确定各方位角下红外辐射测试距离和仪器视场,如图5所示。如果被试发动机为轴对称喷口,不同方位角可以绕 0° 角对称选择。

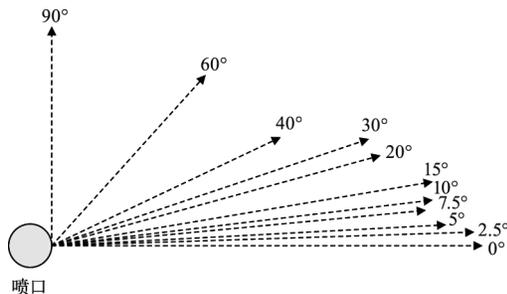


图5 不同方位角测点布置示意
Fig.5 Schematic arrangement of measurement points in different azimuths

3.3.4 试验程序

试验过程中,为了避免环境辐射以及太阳光对测试结果造成较大的影响,选择晴朗夜间进行测试试验,能更好的提高测试精度。试验前,首先进行发动机检查试车,对发动机工作状态进行确认,防止发动机状态不稳定影响测试结果。中国飞行试验研究院目前具备试验需要的所有测试设备,并根据相关测试经验,进行正式实验前,先进行相摸底测试试验,对测试对象的辐射特性有一定的了解后,再进行正式测试,以便选择合适的积分时间。

正式测试时,按照正常程序对发动机进行启动、暖机,之后在发动机测试状态稳定3 min后,进行红外测试,完成测试任务后,发动机按照正常程序停车,典型试车曲线如图6所示。

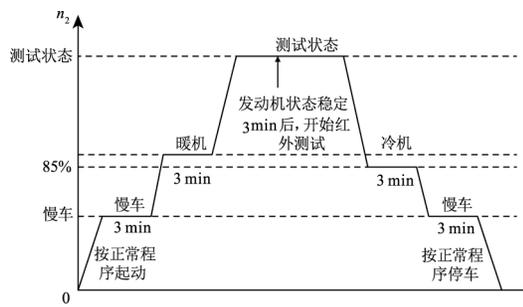


图6 发动机红外测试典型试车程序

Fig.6 Typical commissioning procedure for engine infrared testing

4 数据分析及验证

4.1 光谱辐射计数据分析方法

发动机红外辐射特性测量采用红外光谱辐射计时,获取的测量结果信号是目标与背景的辐射之和,需扣除背景辐射得到目标辐射强度。由于尾焰呈锯齿形式的结构,针对于尾焰的测试,集中在尾焰核心区,同时因为尾焰变动,傅里叶测试结果不准确,根据测试经验采用色散型光谱仪。在实际测试过程中根据发动机的状态利用红外热像仪的图像合理选择

核心区的长度进行背景辐射的扣除。其中目标辐射亮度 L_t 由下式计算得到:

$$L_t = L_{tb} - k \cdot L_{bg} \quad (1)$$

式中, L_t 为计算出的目标辐射亮度, 单位 $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$; L_{tb} 为测量的背景与目标辐射亮度之和, $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$; k 为背景占视场的比例系数; L_{bg} 为针对背景标定获得的辐射亮度, $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1}$ 。

其中, k 值可由式(2)得到:

$$k = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \quad (2)$$

式中, A_t 为所测量的目标辐射面积 (m^2); A_0 为在测量距离 s 处 (目标处) 的视场面积 (m^2)。

A_0 值可由下式得到:

$$A_0 = \pi s^2 \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$

式中, s 为测量距离, m ; θ 为仪器视场角 ($^\circ$)。

最终由式(1)中目标辐射亮度 L_t , 以及下式进一步计算目标辐射强度 I_t :

$$I_t = A_0 \cdot L_t \quad (4)$$

4.2 热像仪数据分析方法

红外热像接受到的信号为被测目标的红外辐射能量分布, 其原理是向红外线探测器的光敏元件发射一定能量, 从而形成热像图, 同时还可以得到目标的辐射亮度。目标红外热像图中单个像素点对应的目标面积可以使用热像仪的瞬时视场和测点距离得到, 并结合辐射亮度计算得到被测目标的红外辐射强度, 公式为:

$$I = \varepsilon \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m L_{ij} (s \cdot \theta)^2 \quad (5)$$

其中, s 为距离, 单位为 m ; θ 为热像仪的视角, 单位为 rad ; L_{ij} 为单元点 (i, j) 出的辐射亮度值; ε 为计算修正系数, 由气象参数以及黑体校准结果综合评定给出。

4.3 不确定度分析

在发动机红外隐身测试过程中的不确定度影响因素主要包括: 红外测量设备自身的系统误差、背景辐射影响、大气透过率误差等, 在实际测试过程中, 将根据测量现场的实际条件, 综合评估, 给出测试结果的误差分析。

4.4 试验验证

根据以上制定的方法, 开展了某轴对称尾喷管形式的发动机整机台架红外测试试验, 采用 SR-5000 系统的光谱辐射计对发动机不同状态进行红

外测试, 根据前期标定的发动机尾喷口尺寸, 以及尾流核心区长度, 选择 7 mrad 视场的测试仪器, 试验前高温黑体进行标定, 发动机 0° 方位角某典型状态条件下不同波段光谱强度曲线如图 7 所示。可以看出发动机的光谱强度主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波段、 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的长波段, 而 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$ 波段附件的光谱辐射强度较低, 所有测试仪器测得的试验结果类似, 这是因为该波段的红外强度被大气中的水气以及二氧化碳吸收了。

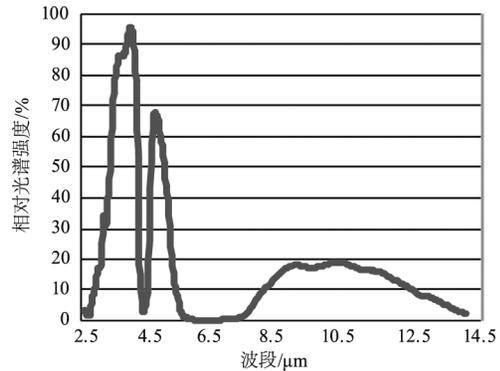


图 7 典型状态下光谱强度随波段的变化

Fig. 7 Spectral intensity varies with band in typical states

对光谱辐射数据处理, 分别对中波段以及长波段的红外辐射强度进行积分, 获得了该方位角条件下中波辐射强度以及长波辐射强度。使用该方法可以获得不同方位角条件下的中波红外辐射强度、长波红外辐射强度。同时使用 MR170 系统光谱辐射计对发动机不同状态进行红外测试, 两型设备在典型工况条件下, 不同方位角条件下不同波段测试结果见图 8。

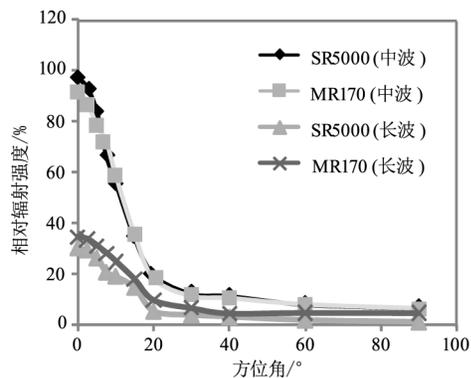


图 8 典型状态下光谱强度随波段的变化

Fig. 8 Spectral intensity varies with band in typical states

可以看出通过两型不同的光谱辐射计, 测得某发动机同一工况下的中波辐射强度以及长波辐射强度, 其变化规律具有一致性, 两者测量结果绝对值相差 $< 5\%$, 说明该测试方法测得的结果具有较高的一致性和可信性。同时可以看出, 同一型

设备中波红外辐射强度值远大于长波下的红外辐射强度值,针对这一现象,在设计发动机红外隐身性能特性时,着重考虑中波条件下的隐身性能特性,能够更好的提高航空武器装备的红外隐身特性。分析不同方位角条件下发动机红外辐射强度的变化规律可以看出,随着测试方位角的增大,测得的发动机红外辐射值迅速下降,这是由于小角度测点下,测试设备测得的主要是发动机尾喷口内部高温核心件涡轮以及喷口的红外辐射强度,随着测试方位角的增大,测试设备主要测量的是发动机高温尾流的红外辐射。可以看出,虽然发动机尾流占据较大的面积,其红外辐射只是占据比较小的比例,所以在后续设计中采用二元式、S弯等异形喷管,可以有效遮挡发动机尾喷口内的高温区域,从而达到高效的隐身作用。

5 结论

(1)提出了航空发动机整机台架红外辐射特性测试的一种测试技术方法,采用空旷的标准露天试车台,满足不同方位角的测试,试验时,考虑环境、气象、测试设备的影响,能够到达较高精度的测量;

(2)发动机设计过程中,考虑发动机红外隐身特性,应着重于中波条件下的隐身性能特性设计,能够更好的提高航空武器装备的红外隐身特性;

(3)采用二元式、S弯等异形喷管,可以有效遮挡发动机尾喷口内的高温区域,从而达到高效的隐身措施。

参考文献:

- [1] Luo Mingdong, Jihong Lake, Huang Wei, et al. Method for measuring infrared spectral radiation intensity in exhaust system with FTIR spectrometer [J]. Journal of Aerodynamics, 2007, 22(9): 1423 - 1429. (in Chinese)
罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1423 - 1429.
- [2] Liu Jian, Jihong Lake. Fighter 8 - 14 μm M-band infrared characteristics and low emissivity material stealth effect [J]. Journal of Aerodynamics, 2014, 29(2): 259 - 267. (in Chinese)
刘健, 吉洪湖. 战斗机 8 - 14 μm 波段红外特征及低发射率材料隐身效果 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 259 - 267.
- [3] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Lu Yanlong, et al. Research on aircraft infrared radiation characteristics and detection technology [J]. Laser & Infrared, 2012, 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, 2012, 41(9): 998 - 999.
- [4] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Analysis of aircraft infrared radiation characteristics and vulnerability assessment [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.
- [5] Mc Glynn J D, Auerbach S P. IR signature prediction errors for skin-heated aerial targets [J]. Proceedings of SPIE on the International Society for Optical Engineering, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation-III, 1997, 3062: 22 - 30.
- [6] Clord L Bore. Integrated design of fighters with stores for best aeroforce value [J]. Aerospace Sci., 1997, 33: 709 - 730.
- [7] Beier K. Infrared radiation model for aircraft and reentry vehicle [J]. SPIE, 1988, 972: 363 - 374.
- [8] Noah M, Kristl J. Niratam-Nato infrared air target model [J]. SPIE, 1991, 1479: 275 - 282.
- [9] Bakker E J. Modeling multi-spectral imagery data with NIRATAM v3. 1 and NPLUME v1. 6 [J]. SPIE, 1991, 3699: 275 - 282.
- [10] Sidonie Lefebvre, Antoine Roblin, Suzanne Varet, et al. A methodological approach for statistical evaluation of aircraft infrared signature [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95: 484 - 493.
- [11] Johansson M, Dalenbring M. Calculation of IR signatures from airborne vehicles [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6228: 622 - 813.
- [12] Coiro E. Global illumination technique for aircraft infrared signature calculations [J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(1): 103 - 114.
- [13] Baranwal N, Mahulikar S P. Aircraft engine's infrared lock-on range due to back pressure penalty from choked converging nozzle [J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 39: 377 - 383.
- [14] Chen Shiguo, Jiang Yong, Fang Haobai, et al. Jet engine infrared radiation imaging test, processing and evaluation [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.
- [15] GJB 241A - 2010, 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010.