

综述与评论

飞机目标红外辐射特性研究现状概述

康丽珠¹, 赵劲松¹, 李振华², 周倩³, 赵强¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 国防大学, 北京 100856; 3. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 主要介绍了近年来国内外飞机目标红外辐射特性研究现状。分别介绍了影响飞机目标红外辐射特性的主要物理因素, 国外飞机目标红外辐射特性计算软件, 飞机目标主要红外辐射源, 飞行目标红外辐射特性外场飞行测试与相应软件仿真误差, 以及国内飞机目标红外辐射特性研究现状。

关键词: 红外辐射特性; 飞机目标; 辐射源

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)02-0105-11

The Overview of the Research Work Developments on Infrared Signature of Aircrafts

KANG Lizhu¹, ZHAO Jinsong¹, LI Zhenhua², ZHOU Qian³, ZHAO Qiang¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 2. National Defense University PLA China, Beijing 100856, China; 3. Tsinghua University, Graduate School at Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In this paper the research work developments on infrared signature of aircrafts in recent years are presented. For a concerned infrared aircraft target, the key physical factors, the simulating software, the major infrared sources, the field flight testing and the corresponding software simulating errors are introduced foreign respectively, as well as the developments on the same research field in China.

Key words: infrared signature, aircraft target, infrared sources

0 引言

随着红外光电对抗技术的发展, 国内外持续 20 多年对红外目标辐射特性开展深入研究。飞机目标红外辐射特性主要是指飞机作为红外目标所产生的红外光谱辐射强度。一方面, 飞机在飞行过程中与空气摩擦产生气动加热的热量、发动机热部件向外传导的热量、尾焰的热量及后两者对蒙皮进行的再加温, 这些主要因素对飞机蒙皮红外辐射量的贡献是不可忽视的。另一方面, 飞机蒙皮受到太阳、天空、大地的背景辐射也会反射红外辐射量。飞机亚音速或超音速飞行时尾焰和蒙皮均会产生较大的红外辐射强度^[1], 这有利于红外光电探测系统对飞机目标实现探测和预警。因此, 飞机目标红外辐射特性研究及相关技术, 以其重要的军事意义, 已成为国内外各大研究院所重点研究的技术领域之一。

目前, 飞机目标红外辐射特性的相关研究成果主

要都是由欧美掌握的, 由于军事保密性, 其大量关键的技术和数据并未公开。同时, 由于实际战场环境较复杂, 必须在实战中才能获取更多的飞机目标红外辐射特性, 这对 30 多年坚持和平建设的中国是比较困难的。国内几家单位对该领域开展了探索性研究, 并取得一定的成果。本文将围绕飞机目标的红外辐射特性发展现状进行分析和讨论。

1 影响飞机目标红外辐射特性的主要因素

辐射功率就是单位时间内发射的辐射能, 用 P 表示, W ; 辐射源单位面积向半球空间 (立体角为 2π) 发射的辐射功率, 称为辐射源的辐出度 M , W/m^2 ; A 表示辐射面积, m^2 。相应一面辐射源的辐射功率 P 可以表示为公式(1)所示:

$$P = \int_A M dA \quad (1)$$

普朗克推导出了描述黑体辐射光谱分布的公式,

收稿日期: 2016-12-20; 修订日期: 2017-01-10.

作者简介: 康丽珠, 女 (1983-), 博士研究生, 主要从事红外光学技术的研究。E-mail: kangbingxin@126.com.

通讯作者: 赵劲松, 男 (1972-), 博士, 研究员级高级工程师, 博士生导师。主要研究红外光学和红外成像技术。E-mail: zhaojinsong@tsinghua.org.cn.

即黑体的光谱辐出度 M_λ 如公式(2)所示：

$$M_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

式中： λ 为波长； T 为绝对温度； c_1 为第一辐射常数； c_2 为第二辐射常数。

国外将飞机视为灰体，灰体发射率对所有波长都是一个常数，用 ε 表示。则公式(1)可写为公式(3)：

$$P' = \varepsilon \int_A M dA \quad (3)$$

由公式(1)~(3)可知，影响飞机目标红外辐射特性的主要因素有飞机蒙皮温度 T 、蒙皮发射率 ε 、蒙皮辐射面积 A 和波长 λ 。要抑制飞机目标红外辐射特性，可通过以下主要方式来实现：控制飞机蒙皮的温度 T ，特别是飞机高热部分和尾焰的温度；减小飞机的蒙皮发射率 ε ；减小飞机蒙皮的辐射面积 A ；改变飞机机体热源的辐射波长 λ 范围。

美国在抑制战机红外辐射特性方面发明了大量专利，这些红外隐身技术的专利应用包括：改变发动机及其喷管的外形结构，加强废气与空气的混合，降低排气温度，改善温度分布^[2-4]；改变飞机的几何形状，减小飞机蒙皮的辐射面积^[5]；采用喷涂吸收红外层及使用隔热泡沫塑料等材料，降低飞机蒙皮红外辐射量^[6-7]；抑制尾焰的红外辐射量^[8]；采用喷管冷却技术^[9]和液体蒸发冷却技术^[10]，达到快速降温的目的。

2 飞机目标红外辐射特性国外研究现状

2.1 飞机目标红外辐射特性计算软件

西方军事强国很早就开展了飞机目标红外辐射特性研究，在红外辐射强度计算方面发展很快，主要体现之一是对应软件的开发取得了很多的成果。目前国际上比较成熟的飞机目标红外辐射特性计算软件主要有 NIRATAM、SIRUS、NTCS 等^[11]。计算机技术的不断发展和计算模型、算法的不断完善，为飞机目标红外辐射特性的研究提供了坚实的技术基础，飞机目标红外辐射强度的计算精度也在日益提高。

作为国外比较著名的红外辐射特性计算软件，北

大西洋公约组织（NATO）空中目标红外辐射软件 NIRATAM 于 1991 年由 NATO 内部的丹麦、法国、德国、意大利、荷兰、美国和英国合作研制^[12]，用于空中目标红外辐射特性计算，特别适用于固定翼飞行器、直升机和飞行中的反导武器^[13-16]。NIRATAM 基于理论研究、外场测量和红外数据分析。NIRATAM 能仿真飞机和大气的红外辐射特性，其中，大气红外传输特性调用 LOWTRAN 计算。

NIRATAM 为模块化结构，共分 5 个分模块和一个整合模块，整合模块将 5 个分模块整合为一个软件，每个模块的名称和相应国家担任的工作任务如表 1 所示。GEO 模块是飞机外形的子程序库，BOAT 模块计算尾焰流的推进气体的流场，SOLTRAN 模块采用 LOWTRAN 5B，主要用来计算大气红外辐射传输衰减。

2003 年 BAE 系统中心开发了 SIRUS 计算软件，SIRUS 主要是用来仿真飞行器的红外辐射特性^[17-18]。SIRUS 主要由以下几部分组成：飞行器表面辐射；飞行器表面反射的辐射（双向反射）；飞行器腔体辐射；尾焰辐射；红外大气辐射；背景辐射；传感器效应。

2006 年瑞典国防研究中心（Swedish National Defense Research Center）开发了 SIGGE 软件，该软件能有效地计算喷嘴和尾焰的红外辐射特性^[19]。

2010 年法国国家航空航天研究中心（ONERA）开发了一套飞机目标红外辐射特性计算软件 CRIRA^[20]。

除上述软件外，国外开发的商业软件有 SEWORKBENCH^[21]、Radtherm-IR^[22]、SAFIR^[23]和 SEISM^[24]，这些软件能有效地获得飞机目标红外辐射特性，包括用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）计算尾焰的红外辐射量。比利时国防建设中心（Belgium Defense Establishment）开发了开源软件 OSMOSIS^[25]，该软件用来计算船的红外辐射特性，最后扩展到计算飞机的红外辐射特性。

表 1 NIRATAM 的模块与功能 Table 1 Modules and functions of NIRATAM

模块	功能	国家
GEO	A/C 表面的产生和投影	丹麦
IRMA	气体/颗粒和发动机的辐射	德国
BOAT	尾焰流场的产生	美国
SOLTRAN	大气和背景的传输和发射	美国
SUN/BACKG	太阳反射，目标蒙皮辐射和环境的融合	荷兰
INTEGRATION	程序主结构	荷兰

Martinez 开发了大型商用飞机的红外辐射特性软件 LCAIR^[26],主要是计算大型商用飞机起飞和降落时的红外辐射强度。Harkiss 在模型里介绍了双向反射,但模型不包括尾焰的红外辐射特性计算。Reinov 等人在 Radtherm 的基础上,开展了商用飞机的红外辐射特性计算,用半经验方法提取排气管、尾焰和热部件的试验数据^[27]。Mei 给出了一种民用飞机尾焰红外图像的计算机图像处理方法^[28]。

国外除了开发飞机目标红外辐射特性计算软件外,还进行了一些局部理论研究。

1999 年 Davis 工程有限公司开发了 3D 目标红外辐射模型 NTCS,假设在没有大气衰减的情况下,Davis 工程公司使用该模型计算出了旋翼直升机 Bell UH-1H 的红外辐射强度,如图 1 所示^[29]。

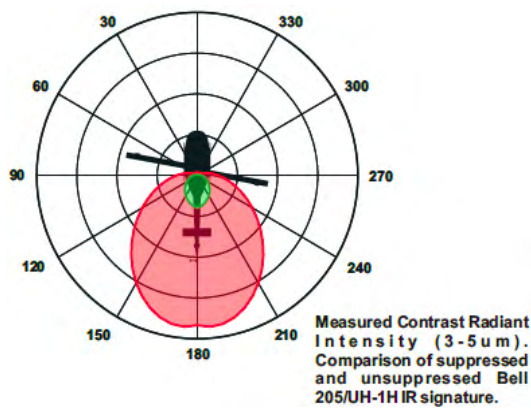


图 1 Bell 205/UH-1H 直升机中波红外辐射强度

Fig.1 Measured contrast radiant intensity of Bell 205/UH-1H

2007 年至今,孟买的印度技术研究所 (Indian Institute of Technology-Bombay) S. P. Mahulikar 开展飞机目标红外辐射特性研究^[30-34],不仅考虑飞机的蒙皮由气动加热产生辐射、发动机辐射、反射环境辐射等

的影响,还考虑了大气衰减对红外辐射特性的影响。

2010 年和 2011 年,法国国家航空航天研究中心的 Lefebvre 研究了飞机目标红外辐射特性的计算误差^[35-36]。2011 年南非的 Cornelius J. Willers 研究了飞机不同波段的红外辐射特性,并给出了背景辐射对飞机红外辐射强度的影响,如图 2 所示。

2012 年 Retief 对飞机尾焰红外辐射特性进行研究,并建立了尾焰红外辐射特性计算模型^[37]。

2013 年法国国家航空航天研究中心的 E. Coiro 在 CRIRA 的基础上,研究飞机在输入条件未知下的红外辐射特性,这些未知条件主要包括天气状况、飞机俯仰角度、飞机飞行速度、飞机蒙皮材料特性等^[20]。

2014 年印度技术研究所的 Nidhi Baranwal 对具有壅塞式喷管的飞机引擎的红外辐射特性进行研究^[38]。2016 年印度技术研究所的 Nidhi Baranwal 对具有壅塞式喷管的飞机引擎的红外图像进行研究,主要讨论壅塞式喷管的面积和观测角度对飞机引擎红外辐射特性的影响^[39]。

2016 年美国 D. Burleigh 对铝结构的飞机涂层的红外辐射特性进行了研究^[40]。

2.2 飞机目标主要红外辐射源

北约空中目标红外辐射计算软件 NIRATAM 将飞机目标红外辐射源分为 3 部分: 发动机发热部位(包括排气管); 尾焰中的推进气体,其主要成分为 H₂O、CO₂、CO 和碳颗粒; 机身蒙皮的辐射源由以下两部分产生: 气动加热和内部热源的热传导辐射; 反射天空、地面、太阳的辐射。

上述各部分辐射在整个红外辐射中的比重依赖于动力系统、几何结构、表面温度、光学特性、环境条件以及飞行参数。

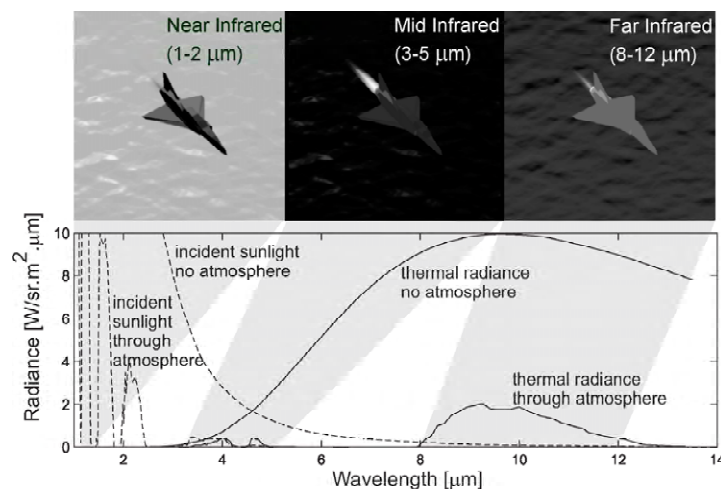


图 2 飞机不同波段红外热像图和飞机反射背景的辐射强度

Fig. 2 Infrared signature of different bands and the effect of background radiation on aircraft

发动机的红外辐射在整个飞机目标红外辐射中占主要地位，其辐射量大小对红外光电探测系统至关重要。发动机的红外辐射量与发动机的类型、推力比、飞行高度、飞行速度、喷出气流的速度有关^[41]。飞机的尾焰也是重要的辐射源，在飞机飞行过程中，尾焰由于排气作用拖得很长，并且尾焰红外辐射能辐照向机体前半部，特别是在尾追和迎头方向探测时，尾焰辐射成为重要的辐射源之一。TU Delft 大学航空航天工程学院 (TU Delft Faculty of Aerospace Engineering) 给出的飞机尾焰红外信号仿真示意图如图 3 所示。蒙皮红外辐射包括蒙皮由于气动加热产生的辐射、内部导热、尾焰向前辐照加热以及蒙皮对天空、地面环境和太阳的红外辐射的反射^[42]，如图 4 所示。飞机蒙皮的红外辐射不仅与它的材料、结构、热特性等有关，还与周围大气、环境及过去的热状态等因素有着密切联系。飞机高速在空中飞行，相当于气体高速流过机体表面，气流的一部分动能将转变为热能（即气动加热），并使机体蒙皮温度升高，同时，由于机体蒙皮面积较大，使得蒙皮辐射成为重要的辐射源之一。不

同的探测方向，飞机蒙皮的投影面积不一样；不同的机动姿势，飞机蒙皮的投影面积也不一样。

由于飞机的红外辐射源数目较多，而且红外辐射强度随探测视角变化而变化，飞机的红外辐射特征并不是以上几种辐射源的简单叠加，如图 5 所示^[43]。因此，应对探测方向上的飞机有限辐射面积进行投影。任意视线方向上的红外辐射强度可分解为视线在飞机机身纵向对称平面投影方向上和视线在翼展平面投影方向上的红外辐射强度。根据飞机的几何形状将飞机分成多个灰体辐射源，并对其形状进行近似求得探测方向的投影面积。

印度技术研究所的 S. P. Mahulikar 给出的飞机的红外辐射源如图 6 所示^[30]。一类辐射是由于飞机在飞行过程中与空气摩擦产生的热量，以及发动机燃烧等热部件向外传导的热量和尾焰对蒙皮进行加温产生的。另一类辐射是飞机蒙皮受到背景的辐照，背景辐射包括太阳辐射、地球反射太阳辐射、地球自身红外辐射，背景辐射对飞机蒙皮的辐射情况较为复杂。



图 3 飞机尾焰红外辐射模型

Fig.3 Infrared signature modeling of plume

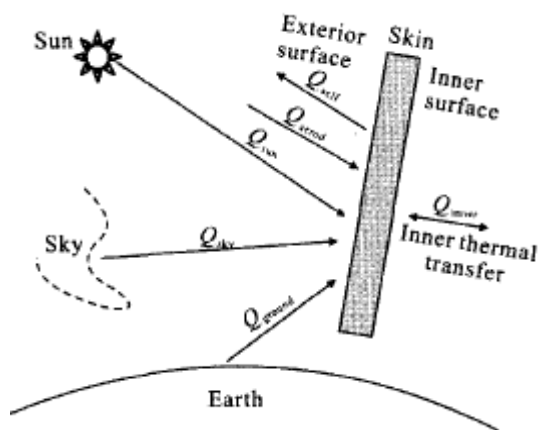


图 4 典型飞机的红外辐射源

Fig.4 Sources of IR radiance from typical fighter plane

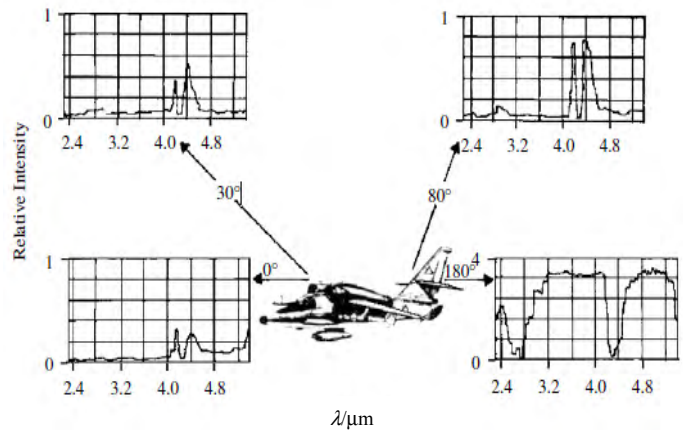


图 5 不同观察角度下的固定翼飞机的红外辐射强度分布图

Fig.5 Infrared signature variation of gas turbine engine-powered fixed wing aircraft

1999 年 Davis 工程公司给出的旋翼直升机 Bell UH-1H 的红外辐射源包括 4 部分^[44]：发动机部分，Bell UH-1H 发动机温度能达到 600 ~ 700 ；尾喷管部分，尾喷管能达到 120 ，红外光电探测系统追踪 Bell UH-1H 的尾部时，尾喷管能提供明显的红外辐射；尾焰；被尾焰加热的尾梁。旋翼直升机的红外热图如图 7 所示。

2010 年法国国家航空航天研究中心开发的飞机目标红外辐射特性计算工具 CRIRA，给出了与 NIRATAM 一致的红外辐射源，如图 8 所示^[20]。

图 9 是 F-22 的中波红外视频截图，资料来自于 2010 年英国范保罗 (Farnborough) 航展。F-22 在这 6

种姿态中均有强烈的红外辐射强度，飞机左右机动、俯冲、翻滚时红外特征也会有很大的不同，喷气式飞机的红外辐射最大值发生在它的尾追方向，红外辐射最小值发生在迎头方面。特别值得注意的是，在突破音障时，高温尾气流包裹着机身，形成强烈的红外辐射。从俯视和仰视探测，由于目标面积较大，所以 F-22 蒙皮的反射辐射较强。很显然，F-22 的中波红外隐身效果并不佳。

目前国外公开发表的飞机红外辐射特性的文章有限，在飞机目标红外辐射特性建模过程中，所采用的方法各不相同，但认定的红外辐射源基本是一致的。

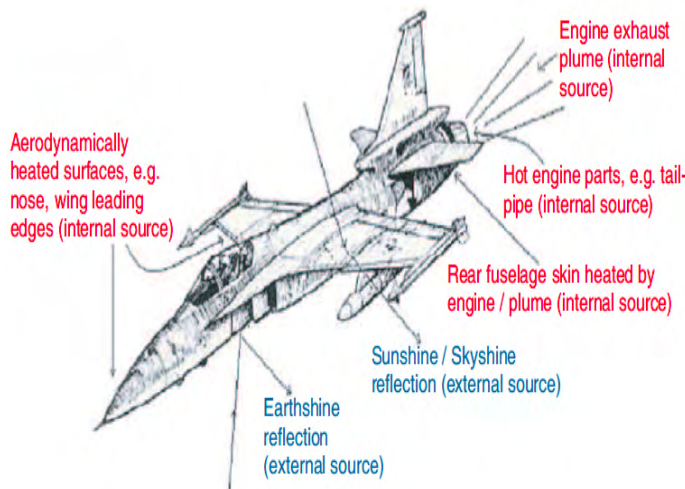


图 6 飞机红外辐射源及其分类

Fig. 6 Sources of infrared signature from aircraft and their classification

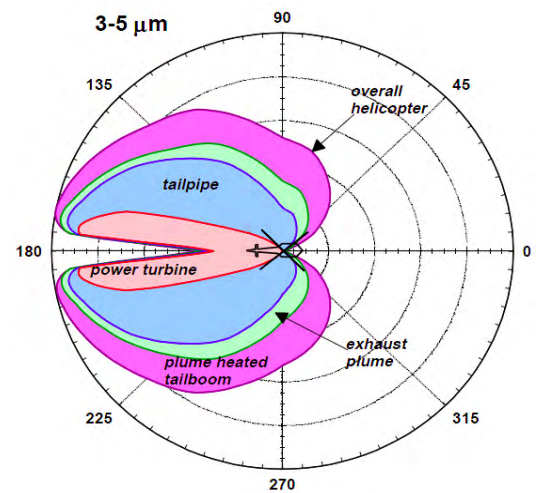


图 7 涡轮旋翼 Bell UH-1H 直升机红外辐射特性变动

Fig.7 Infrared signature variation of gas turbine engine-powered rotary wing aircraft Bell UH-1H

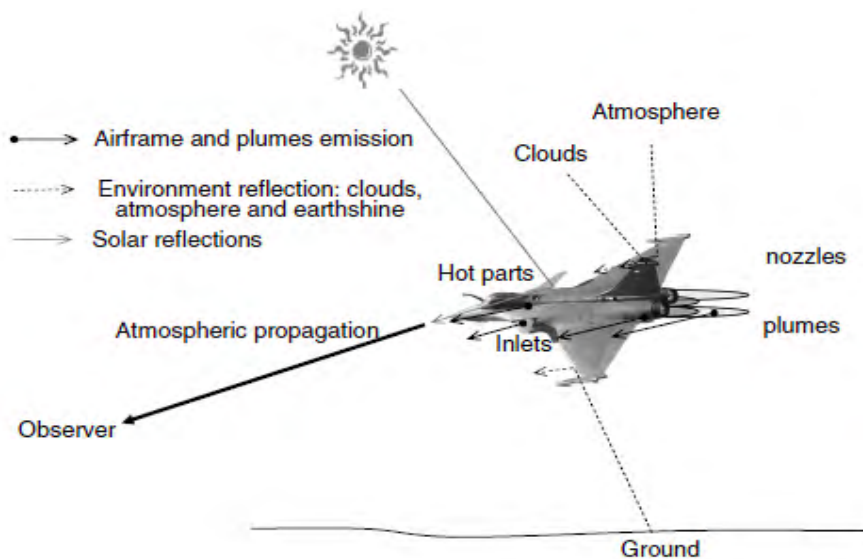


图 8 飞机红外辐射源的主要构成

Fig. 8 The main contributors to the infrared sources of aircraft

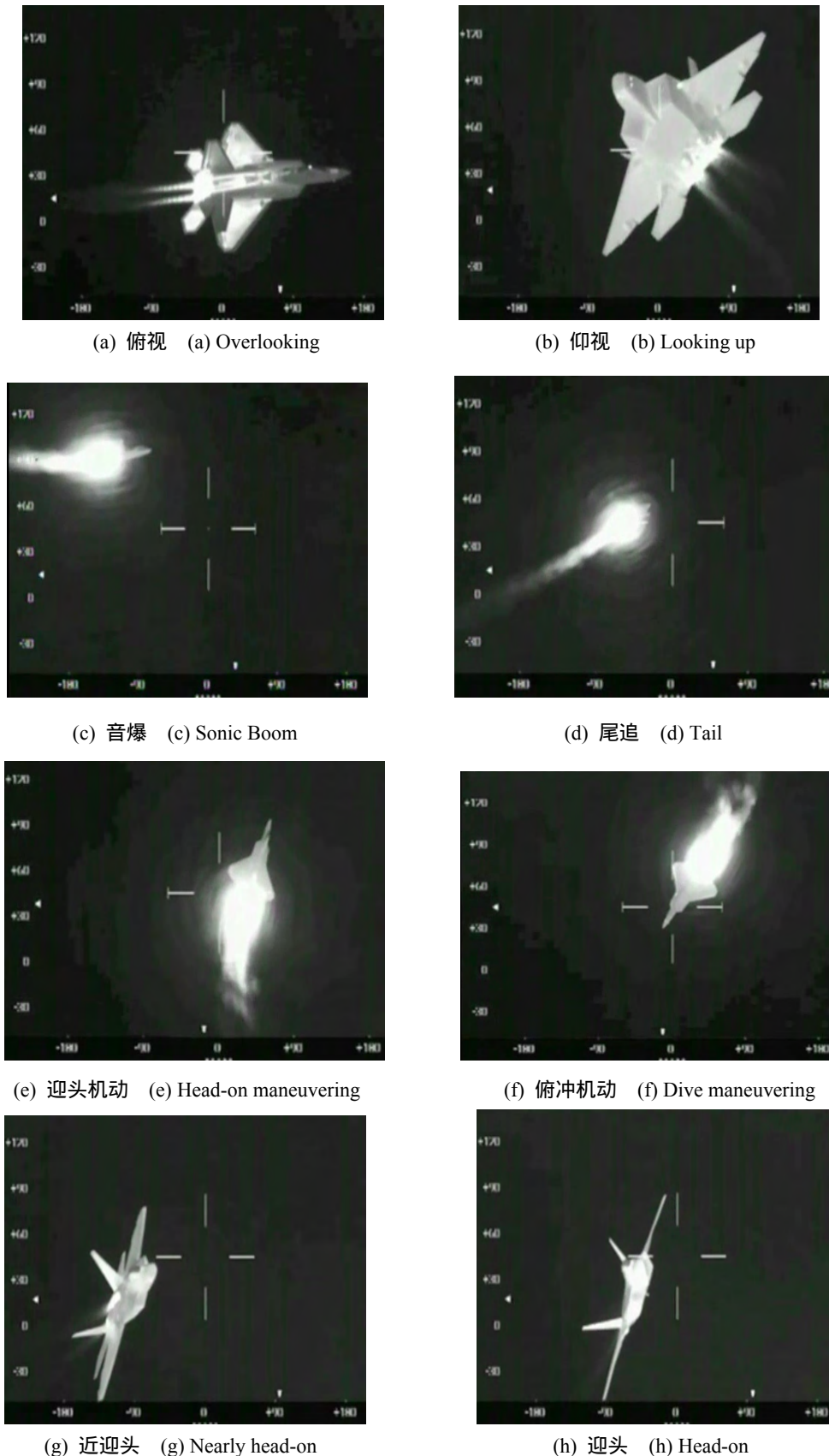


图 9 F-22 红外图像

Fig.9 F-22 infrared images

2.3 飞行目标红外辐射特性测试与仿真模型误差分析
美国洛克希德·马丁公司开发了光谱成像红外信号仿真软件,该软件可仿真计算 0.4 ~ 25 μm 波段内战

机的红外辐射信号,并输出红外视频图像、光谱辐射强度值和波段内红外辐射强度值、信号源贡献,以及计算传感器的探测/锁定距离。该项目以支撑飞行试验

验证使用和后续红外光谱校验预测。为了开发高精度的 F-22 红外模型,该软件采用的输入(如几何参数、温度数据、材料特性等)来源于样件测试、装有 F119 引擎的跑车试验、及 F-22 项目组的测量和预算。

2000 年秋季在爱德华兹空军基地(EAFB)完成了针对 F-22 的红外测试^[45], F-22 被测试飞机 4002 带有红外涂层,超过 45 个温度传感器被用于 4002 机身外表面。已飞行了 13 驾次,多数位于海军空战中

心(NAWC)武器部海试范围的水域,并取得约 17h 飞行红外信号数据。飞行测试吊舱为 F-15B,红外成像仪漂移在飞行中以每 15 min 一次被校对,如图 10 所示^[45]。在每架次试验后执行快览数据回放,确保数据完整性,以便后续简化和分析。工作视频如图 11 所示^[45], F-22 红外信号模型校验流程如图 12 所示^[45], F-22 红外信号模型校验结果如图 13 所示^[45]。



图 10 飞行中 F-22 的红外信号测试(从左到右为:挂载吊舱的 F-15B, F-22 测试机)

Fig.10 F-22 in-flight infrared signature measurements (left to right: F-15B and F-22 test aircraft)

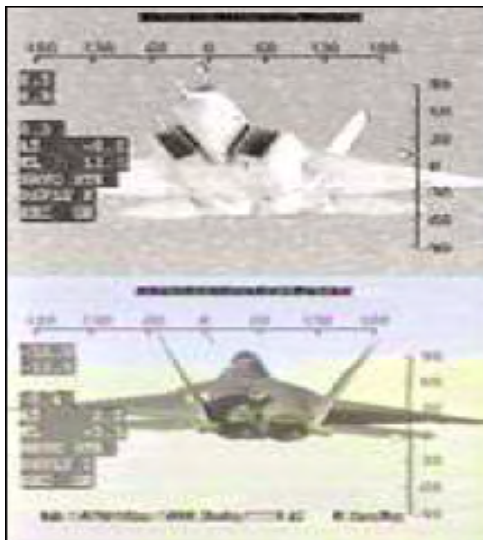


图 11 F-22 工作视频 Fig.11 F-22 operator video

由图 13 可得出:飞机正迎头方向测试结果与仿真模型预测结果的误差一般不超过 $\pm 25\%$,随着飞机俯仰角增大,误差随之增大,仰角 $\pm 20^\circ$ 侧向 45° 的误差甚至达到 100%。

实测 F-22 战机红外辐射量的数据可以更好地校验仿真模型的计算精度,但是实测 F-22 战机不仅需要巨额项目资金以研制多光谱成像测量吊舱系统及外场飞行试验,还需要多个部门配合,是一件工作量巨大的工作。

3 飞机目标红外辐射特性国内研究现状

1998 年航天工业总公司二院 207 所的李墨瑞在工程分析软件 PATRAN 环境下对飞机红外辐射模型进行了系统集成^[46]。

1999 年北京航空航天大学的徐南荣教授讨论了飞行器的 3 种主要红外辐射源,即尾焰、热空腔-尾焰组合体、蒙皮的红外辐射特性^[47]。

2007 年中国科学院上海技术物理研究所的高思莉建立了空中飞行目标尾焰的温度和组分分布模型,进而建立了红外辐射特性计算模型^[48]。

2009 年北京航空航天大学的 LU J W 给出了 F-22 不同部位的红外辐射强度示意图,但没有介绍详细的计算模型和验证方法,如图 14 所示^[49]。北京航空航天大学的毛峡等将飞机的红外辐射源分为蒙皮、尾喷口和尾焰 3 部分,并提出了 3 个辐射源在不同波段、不同角度下的红外辐射特性计算方法^[50]。

2010 年解放军电子工程学院的陈卫等建立了非均匀热气体红外辐射计算模型^[51]。

2011 年北京航空航天大学的刘娟等就飞机的红外辐射特性进行了建模与仿真,文中基于发动机工作原理,建立了飞机实时飞行状态下的蒙皮及发动机红外辐射特性模型^[52]。2011 年西安电子科技大学的宗靖国提出了一种新的隐身飞机尾焰红外辐射特性计算模型,

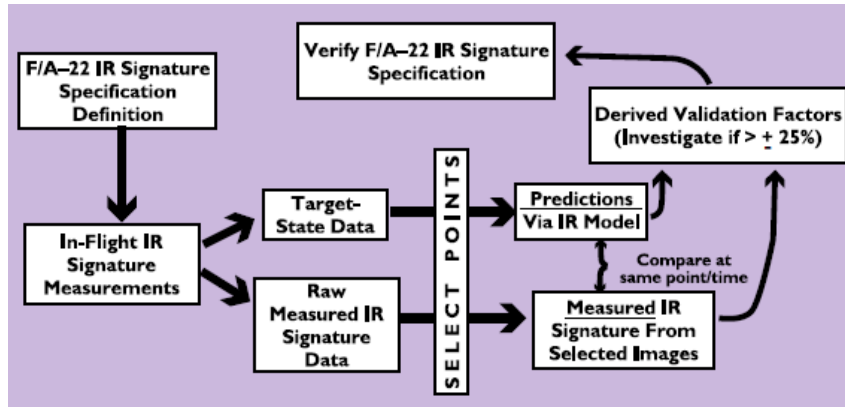


图 12 F-22 红外信号模型校验流程 Fig.12 F-22 infrared signature model validation process

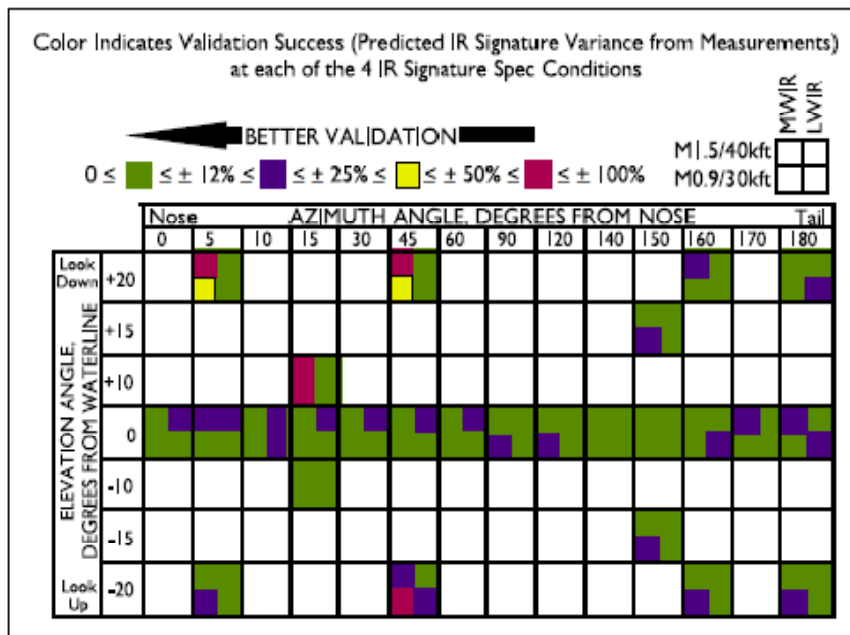


图 13 F-22 红外信号模型校验结果 Fig.13 F-22 infrared signature model validation results

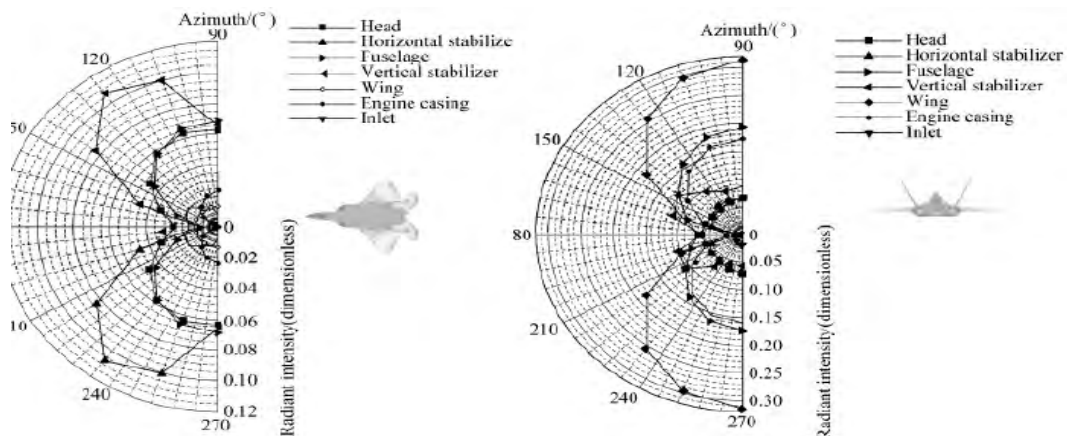


图 14 飞机不同方向的红外辐射特性 Fig. 14 Infrared signature of aircraft in different directions

该模型以普通飞机尾焰红外辐射特性计算模型为基础，进而考虑红外隐身措施的影响，间接实现隐身飞机尾焰的红外辐射特性的计算^[53]。2011 年空军工程大学王超哲对某型飞机探测距离进行了计算和分析，总结出了影响探测效果的 5 个主要的飞机目标红外辐

射特性：光谱特性、方位特性、高度特性、速度特性和发动机状态特性^[54]。

2012 年空军工程大学工程学院的林杰针对飞机整机蒙皮自身辐射特性计算的问题提出一个方法，该方法通过对飞机三维图像建立网格、划分面元，对面

元进行可视性判断及空间遮挡判断,建立求解飞机蒙皮复杂几何外形的红外辐射模型^[55]。

2013 年西北工业大学的徐顶国以典型飞翼布局无人机为研究对象,采用商业软件和自主开发红外计算软件相结合的形式,利用离散传递法计算红外辐射强度分布^[56]。

2014 年空军工程大学李慎波等人建立了飞机机体红外辐射的计算模型,分析了不同波段上机体辐射的方位特征和辐射组成以及太阳辐射、飞行速度、飞行高度对机体红外辐射的影响^[57]。

2015 年南京航空航天大学的黄伟采用 CFD 计算得到的流场、温度场结果,并采用 MODTRAN 计算出环境辐射数据,建立了典型背景下的飞行器红外辐

射特性计算模型^[58]。2015 年北京航空航天大学的李倪给出了不同时刻飞机蒙皮的温度分布^[59],如图 15 所示。由于飞机是一个立体目标,飞机不同部位的表面与太阳光线夹角是不相同的,因此在同一时间,飞机蒙皮的不同部位被入射的太阳辐射是不同的。随时间变化,太阳照射的光线与飞机蒙皮各部分夹角也不停变化,受太阳照射的飞机蒙皮(阳面)的红外辐射强度将明显高于不受太阳照射的表面(阴面)。

2016 年南京航空航天大学的黄伟研究了巡航飞机反射背景的红外辐射特性,高空 11 km 处飞机蒙皮反射背景的红外辐射亮度如图 16 所示^[60]。飞机 3 种蒙皮发射率下的红外辐射强度如图 17 所示^[60]。

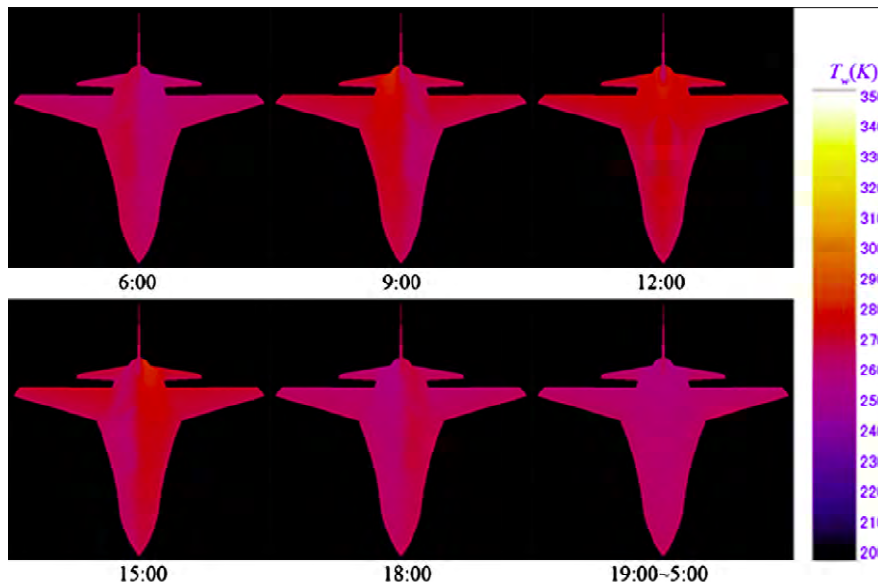


图 15 不同时刻的飞机蒙皮温度 Fig.15 Temperature of aircraft skin at different times

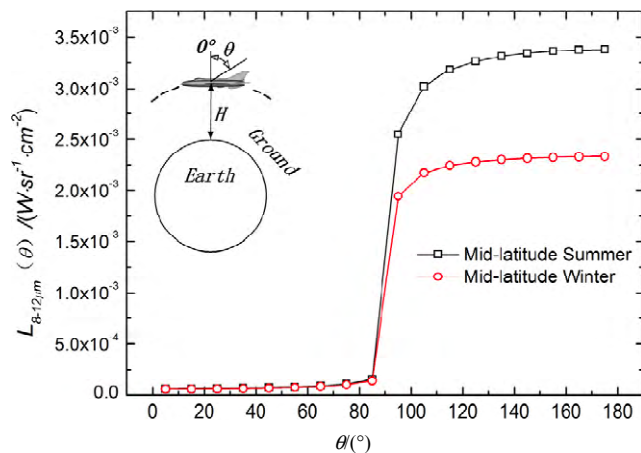


图 16 高空 11km 处飞机蒙皮反射背景的红外辐射亮度
Fig.16 Environmental radiation at the altitude of 11 km

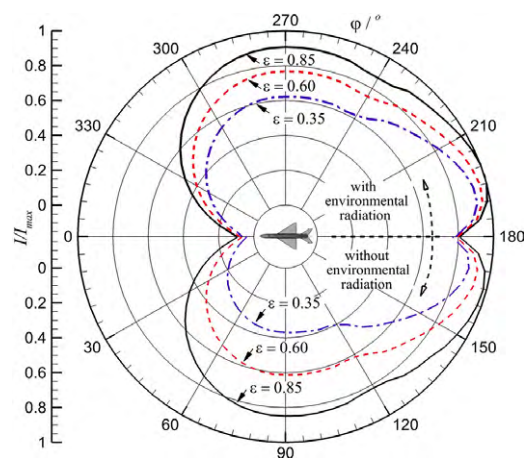


图 17 飞机 3 种蒙皮发射率下的红外辐射强度
($Ma = 1.2, H = 11 \text{ km}$, 中纬度夏季)

Fig.17 Infrared radiation intensity of aircraft with three different emissivities ($Ma = 1.2, H = 11 \text{ km}$)mid-latitude summer)

国内大部分研究工作在建立飞机目标红外辐射特性计算模型时,认定的辐射源基本与北约空中目标红外辐射特性计算模型 NIRATAM 一致。

4 结论

概述了国内外飞机目标红外辐射特性研究现状。近年来美国、法国、印度等均致力于飞机目标红外辐射特性的研究,在理论研究和对应软件开发领域取得了许多成果,飞机目标红外辐射特性计算软件的精度也在日益提高。在飞机目标红外辐射特性建模过程中,各家研究机构所采用的方法不尽相同,但认定的红外辐射源基本是一致的。同时,国外在飞机目标红外辐射特性的实验测量研究方面,已经具备成熟的测试技术,并获得了大量的飞行测量数据。目前,国内部分研究所和高校对飞机目标红外辐射特性做了探索性理论研究,并取得一定的进展,但与国外先进的理论模型、计算软件和飞行实验测试等研究工作相比,依然存在很大差距。

参考文献:

- [1] TONG Zhongxiang, LU Yanlong, LI Chuanliang, et al. Optimal method for interfering with infrared homing missile by airborne infrared smoke[C]//2008 Asia Simulation Conference-7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, 2008: 588-592.
- [2] Iya S K, Roe G M. System and method for controlling the temperature and infrared signature of an engine, US, 7013636 B2[P]. 2006-03-21.
- [3] Wollenweber G C. Method and apparatus for exhausting gases from gas turbine engines, US, 6971240 B2 [P]. 2005-12-06.
- [4] Steyer W, Kieffer C M, Jasany J M, et al. Method and apparatus for suppressing infrared signatures, US ,6988674 B2[P]. 2006-01-06.
- [5] Leupolz A, Scherber W, Rothmund W. Infrared camouflage device, US , 6613420 B1[P]. 2003-09-03.
- [6] Reynolds R F, Kinsell M J. Thermal and visual camouflage system, US, 6338292 B1[P]. 2002-01-15.
- [7] DeSteele J G, Antoniak Z I, White M, et al. Structure and method for controlling the thermal emissivity of a radiating object, US, 6713774 B2[P]. 2004-03-30.
- [8] Vickery C A, Mason J N, Kruse W D, et al. Rocket exhaust plume signature tailoring, US, 6684622 B2[P]. 2004-02-03.
- [9] Engelhardt M. Heat pipe cooling of aircraft skin for infrared radiation matching, US , 6435454 B1[P]. 2002-08-20.
- [10] Miller R C, Seemann R J. Infrared signature reduction of aerodynamic surfaces, US, 4991797[P]. 1991-02-12.
- [11] McGlynn J D, Auerbach S P. IR signature prediction errors for skin-heated aerial targets[C]//Proceedings of SPIE on The International Society for Optical Engineering, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation—III, 1997, **3062**: 22-30.
- [12] Cliord L Bore. Integrated design of fighters with stores for best aeroforce value[J]. *Aerospace Sci.* 1997, **33**: 709-730.
- [13] BEIER K. Infrared Radiation Model for aircraft and reentry vehicle[C] //SPIE,1988, **972**: 363- 374.
- [14] Noah M, Kristl J. NIRATAM-NATO infrared air target model[C]//SPIE, 1991, **1479**: 275-282.
- [15] Bakker E J. Modeling multi-spectral imagery data with NIRATAM v3.1 and NPLUME v1.6[C]//SPIE, 1991, **3699**: 275-282.
- [16] 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.
- [17] Gary J Bishop, Mike J Caola, Rachel M Geatches, et al. SIRUS spectral signature analysis code[C]//Proceedings of SPIE on the International Society for Optical Engineering, Targets and Backgrounds—IX: Characterization and Representation, 2003, **5075**: 259-269.
- [18] Veiga I V. IR Signature modeling at BAE systems ATC[C]// International Target and Background Modeling and Simulation Workshop, 2011: 1-26.
- [19] Johansson M, Dalenbring M. Calculation of IR signatures from airborne vehicles[C]//Proceedings of SPIE, 2006, **6228**: 622-813.
- [20] Coiro E. Global illumination technique for aircraft infrared signature calculations[J]. *Journal of Aircraft*, 2013, **50**(1):103-114.
- [21] Cathala T, Douchin N, Joly A, et al. The use of SE-workbench for aircraft infrared signature, taken into account body, engine, and plume contributions[C]//Proceedings of SPIE, 2010, **7662**: 76620U.
- [22] Schwenger F, Grossmann P, Malaplate A. Validation of the thermal code of Radtherm-IR, IR-Workbench and F-TOM[C]//Proceedings of SPIE, 2009, **7300**: 7300J.
- [23] Dumont R, SAFIR, a software architecture for model interoperability[C] //International Target and Background Modeling & Simulation Workshop, 2007.
- [24] Jagueneau O, Klein Y. SEISM: Scene electro-optical image generator and sensor model[C]//Proceedings of SPIE, 1997, **3063**: doi: 10.1117/12.276077.
- [25] Willers C J, Willers M, Lapierre F. Signature modeling and radiometric rendering equations in infrared scene simulation systems[C]// Proceedings of SPIE, 2011, **8187**: 81870R.
- [26] Martinez R. *Modeling the Infrared Intensity of a Large Commercial Aircraft*[M]. Biblio Scholar, 2005.
- [27] Reinov A, Bushlin Y, Devir A, et al. Thermal and signature modeling of commercial aircraft[C]//International Target and Background Modeling & Simulation Workshop, 2011.

- [28] Mei F. A preliminary model of infrared image generation for exhaust plume[J]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2011, **3**(4): 46-52.
- [29] W. R. Davis Engineer Ltd. Infrared Signature Suppression for aircraft[EB/OL].2008[2016-10-11] www.wrdivas.com/UHa.html.
- [30] Mahulikar S P, Rao G A, Sonawane H S S, Prasad. Infrared Signature Studies of Aircraft and Helicopters[C]//*PIERS Proceedings*, 2009, **8**: 18-21.
- [31] Mahulikar S P, Sane S K. Numerical studies of infrared signature levels of complete aircraft[J]. *Aeronautical Journal*, 2001, **1046**(105): 185-192.
- [32] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A, et al. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **24**(7): 218-245.
- [33] Rao G A, Mahulikar S P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures[J]. *Journal of Aircraft*, 2005, **42**(4): 1046-1054.
- [34] Mahulikar S P, Vijay S, Potnuru S K, et al. Aircraft engine's lock-on envelope due to internal and external sources of infrared signature[J]. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**(3): 1914-1923.
- [35] Lefebvre S, Roblin A, Varet S, et al. A methodological approach for statistical evaluation of aircraft infrared signature[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, **95**(5): 484-493.
- [36] Lefebvre S, Allassonnière S, Durand G, et al. Detection and classification of poorly known aircraft with a low-resolution infrared sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **8050**: 805011.
- [37] Retief S J P. Aircraft plume infrared radiance inversion and subsequent simulation model[C]//*SPIE*, 2012, **8543**: 1-15.
- [38] 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.
- [39] Nidhi Baranwal. Infrared signature of aircraft engine with choked converging nozzle[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2016, **30**(4): 854-861.
- [40] Burleigh D, Vavilov V P, Pawar S S. The influence of optical properties of paints and coatings on the efficiency of infrared nondestructive testing applied to aluminum aircraft structures[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**: 230-238.
- [41] Jérémi Jakubowicz, Sidonie Lefebvre, Florian Maire. Detecting aircraft with a low-resolution infrared sensor[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(6): 3034-3041.
- [42] Nicolas Douchin, Jean Latger. Extension of the SE-workbench for the computation of aircraft infrared signatures[C]//*SPIE*, 2011, **7834**: 11-24.
- [43] Ball R E. *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*[M]. 2nd ed., New York: AIAA Education Series, 2003.
- [44] Thompson J, Birk A M, Cunningham M. Design of infrared signature suppressor for the Bell 205 (UH-1H) helicopters, Part I: aerothermal design[C]//*Proceedings of Seventh CASI Propulsion Symposium*, 1999.
- [45] Jim Cline, Denny Behm. F/A-22 IR signature flight test model validation[J]. *Aircraft Survivability*, 2003: 9-11.
- [46] 李墨瑞, 董雁冰, 刘浩. PATRAN 环境下飞机红外辐射模型系统集成的实现[J]. *系统工程与电子技术*, 1998, **20**(11): 65-67.
- LI Morui, DONG Yanbing, LIU Hao. System integration of airplanes infrared radiation model under PATRAN environment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1998, **20**(11): 65-67.
- [47] 徐南荣, 瞿荣贞. 飞行器的红外特性[J]. *红外与激光工程*, 1999, **28**(1): 8-14.
- XU Nanrong, QU Rongzhen. Infrared signature of flight vehicles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 8-14.
- [48] 高思莉, 汤心溢. 空中飞行目标尾焰红外辐射信号的建模与仿真[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8): 25-27.
- GAO Sili, TANG Xinyi. Building model of the plume released from the flying machine and simulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 25-27.
- [49] LU J W, WANG Q. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, **22**: 493-497.
- [50] 毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, **35**(10): 1228-1232.
- MAO Xia, HU Haiyong, HUANG Kang, et al. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(10): 1228-1232.
- [51] 陈卫, 汪中贤, 马东辉, 等. 非均匀热气体红外辐射特性计算与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(1): 17-21.
- CHEN Wei, WANG Zhongxian, MA Donghui, et al. Calculation and simulation of infrared radiation characteristics of non-uniform hot gas[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 17-21.
- [52] 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.
- LIU Juan, GONG Guanghong, HAN Liang. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1209-1213
- [53] 宗靖国, 张建奇, 刘德连. 隐身飞机尾焰的红外辐射特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 289-292.
- ZONG Jingguo, ZHANG Jianqi, LIU Delian. Infrared radiation characteristics of the stealth aircraft[J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2011, **40**(2): 289-292.

(下转第124页)

- 2013, **8704**: 87040P.
- [13] Breiter R, Eich D, Figgemeier H, et al. Optimized MCT IR-modules for high-performance imaging applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9070**: 90702V.
- [14] Lutz H, Breiter R, Rutzinger S, et al. High-performance IR detector modules for army applications [C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **8704**: 87040A.
- [15] Knowles P, Hipwood L, Shorrocks N, et al. Status of IR detectors for high operating temperature produced by MOVPE growth of MCT on GaAs substrates [C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8541**: 854108.
- [16] Jones C L, Hipwood L G, Shaw C J, et al. High performance MW and LW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6206**: 620610.
- [17] Knowles P, Hipwood L, Pillans L, et al. MCT FPAs at high operating temperatures [C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8185**: 818505.
- [18] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
YANG JianRong. *Physics and Technology of HgCdTe Materials*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [19] Paul D L, Franklin M. R, Hung-Dah S, et al. HDVIP for low-background-flux and high-operating-temperature applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5563**: doi: 10.1117/12.566370.
- [20] Schaake H F, Kinch M A, Chandra D, et al. High operating temperature MWIR detectors [C]//*Proc. of SPIE*, 2010, **7608**: 76081O.
- [21] Robinson J, Kinch M, Marquis M, et al. Case for small pixels: system perspective and FPA challenge[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9100**: 91000I.
- [22] Armstrong J M, Skokan M R, Kinch M A, et al. HDVIP five-micron pitch HgCdTe focal plane arrays [C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9070**: 907033.
- [23] 韩福忠, 周连军, 袁绶章, 等. HgCdTe 红外焦平面探测器从研发到生产[J]. 红外技术, 2014, **36**(4): 271-274.
- HAN Fuzhong, ZHOU Lianjun, YUAN Shouzhong, et al. HgCdTe IRFPA detectors from research to production[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(4): 271-274.
- [24] 龚晓丹, 韩福忠. N₂对碲镉汞干法刻蚀诱导损伤的影响[J]. 红外技术, 2015, **37**(4): 315-322.
- GONG Xiaodan, HAN Fuzhong. The effect of N₂ for dry etching induced damage of HgCdTe[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(4): 315-322.
- [25] 韩福忠, 耿松, 史琪, 等. 碲镉汞红外焦平面器件表面复合膜层钝化技术[J]. 红外技术, 2015, **37**(10): 864-867.
- HAN Fuzhong, GENG Song, SHI Qi, et al. Passivation technology of composite film on the HgCdTe IRFPA[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(10): 864-867.
- [26] 李雄军, 韩福忠, 李东升, 等. 中波碲镉汞光电二极管 pn 结特性研究[J]. 红外技术, 2015, **37**(11): 911-915.
- LI Xiongjun, HAN Fuzhong, LI Dongsheng, et al. A study of pn junction characteristics for MW HgCdTe photodiodes[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(11): 911-915.
- [27] 白丕绩, 姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术, 2015, **37**(2): 89-96.
- BAI Piji, YAO Libin. Read out integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(2): 89-96.
- [28] 姚立斌, 陈楠, 张济清, 等. 数字化红外焦平面技术[J]. 红外技术, 2016, **38**(5): 357-366.
- YAO Libin, CHEN Nan, ZHANG Jiqing, et al. Digital IRFPA technology [J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(5): 357-366.
- (上接第 115 页)
- [54] 王超哲, 董中翔, 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): 1997-1001.
WANG Chaozhe, TONG Zhongxiang, LU Yanlong, et al. Study on the airplane's infrared radiation characteristics[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(9): 1997-1001.
- [55] 林杰, 江勇, 方浩百, 等. 飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J]. 红外技术, 2012, **34**(5): 286-291.
LIN Jie, JIANG Yong, FANG Haobai, et al. Modeling and analysis on self-infrared radiation characteristics of whole aircraft skin[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(5): 286-291.
- [56] 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 880-884.
XU Dingguo, SANG Jianhua, LUO Mingdon. Study on the infrared radiation characteristics Of UAVS skin[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 880-884.
- [57] 李慎波, 董中翔, 王超哲, 等. 飞机机体红外辐射特性研究[J]. 激光与红外, 2014, **44**(7): 739-744.
LI Shenbo, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, et al. Study on the infrared radiation characteristics of the aircraft airframe[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(7): 739-744.
- [58] 黄伟, 吉洪湖. 蒙皮反射的背景辐射对亚声速飞机红外特征的影响研究(一): 方法[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(6): 1699-1703.
HUANG Wei, JI Honghu. Effect of reflected background radiation by skin on infrared signature of subsonic aircraft (): methodology[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2015, **44**(6): 1699-1703.
- [59] LI Ni, LV Zhenhua, WANG Shaodan. A real-time infrared radiation imaging simulation method of aircraft skin with aerodynamic heating effect[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **71**: 533-541.
- [60] HUANG Wei, JI Honghu. Effect of environmental radiation on the long-wave infrared signature of cruise aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, **56**: 125-134.