

## 2013 年的中国红外技术（下）

王忆锋

（昆明物理研究所，云南 昆明 650223）

**摘要：**红外技术是一项典型的军民两用技术。2013 年，国内研究人员发表了大量与红外技术相关的论文。以在军事上的应用或潜在应用为选择依据，对 2013 年国内学术期刊发表的与红外技术有关的 699 篇论文进行了归纳梳理和简要评述。这些论文内容涵盖探测器、光学系统、信号处理技术、制冷技术、红外导弹导引头、红外对抗、目标红外辐射特性、红外大气传输特性、红外场景仿真等各领域。从中可以看出近年来国内红外技术的发展趋势和状态。

**关键词：**红外技术；红外探测器；红外光学系统；红外导引头；红外对抗

**中图分类号：**TN21      **文献标识码：**A      **文章编号：**1001-8891(2014)03-0180-10

## The Infrared Technology of China in 2013 III

WANG Yi-feng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Infrared technology is a kind of typical military/civilian dual-use technology. In 2013, the domestic researchers published numerous infrared technology related papers. For the application or potential application in military as the selection rule, this paper summarizes 699 papers associated with infrared technology and published on the domestic academic journals in the 2013 period, and presents a brief overview of them. The thesis covers various fields such as detector, optical system, signal processing technology, including detectors, optical system, signal processing, cooler techniques, infrared missile seekers, infrared countermeasures, infrared radiation characteristics of target, infrared characteristics of atmospheric transmission, infrared scene simulation and etc. The development trends and status of domestic infrared technology in recent years can be seen from these papers.

**Key words:** infrared technology, infrared detector, infrared optical system, infrared seeker, infrared countmeasure

（接上期）

### 6 目标红外辐射特性

陶金等<sup>[509]</sup>分析了地球大气系统对红外探测的影响。地球下垫面是指与大气下层直接接触的地球表面，包括地形、地质、土壤和植被等。马静等<sup>[510]</sup>分析了地球下垫面的不均匀性对空间目标表面温度的影响。吴晓迪等<sup>[511]</sup>基于温度场理论，计算了卫星表面间自身辐射和空间热流多次散射对卫星红外辐射特性的影响。为了提高空间目标温度估计的准确度，刘莹奇<sup>[512-514]</sup>建立了基于红外探测器测量电子数的评价函数，推导了双波段比色测温法的温度正向求解模型。李范鸣等<sup>[81]</sup>探讨了基于红外偏振特性探测空间目

标的可行性。梁国龙等<sup>[515]</sup>介绍了临近空间目标飞行器地基探测技术。张发强等<sup>[516]</sup>分析了巡航导弹的红外辐射特性。赵晨皓等<sup>[517]</sup>介绍了空天平台红外探测巡航导弹建模与仿真。马鹤等<sup>[518]</sup>基于 MODTRAN 估算了红外系统对巡航导弹的探测距离。黄晨等<sup>[519]</sup>介绍了红外星表在地基红外辐射测量中的应用。

桑建华等<sup>[520]</sup>介绍了各类武器装备的红外辐射源、红外辐射强度控制措施及发展趋势。刘连伟等<sup>[521]</sup>分析了飞行速度和环境温度对导弹蒙皮温度的影响。李建勋等<sup>[522-523]</sup>建立了飞机蒙皮、发动机和尾焰红外辐射计算模型，讨论了红外辐射强度和目标易损性的关系。冯云松等<sup>[524-525]</sup>通过求解飞机蒙皮的一维导热微分方程，得到了蒙皮辐射强度随时间与空间

收稿日期：2013-12-28.

作者简介：王忆锋（1963-），男，湖南零陵人，高级工程师，主要从事器件仿真研究。E-mail: [wangyifeng63@sina.com](mailto:wangyifeng63@sina.com).

的变化关系。徐顶国等<sup>[526]</sup>结合涡扇发动机引射喷管的计算流体动力学分析,得到了后机身蒙皮在长波红外波段的辐射强度分布。反射辐射是目标辐射特性的重要组成部分,樊宏杰等<sup>[527]</sup>构建了空中目标的反射辐射特性模型,其中考虑了空中目标反射天空背景辐射、反射太阳直射辐射、反射地面背景辐射等因素。徐顶国等<sup>[528]</sup>分析了背景辐射对无人机红外辐射特性的影响。黄全军等<sup>[529]</sup>介绍了国外先进战机红外隐身技术的发展趋势。

张志波等<sup>[530]</sup>介绍了一种结合红外辐射理论和射流动力学理论的飞机红外辐射特性建模与计算方法。喷管是通过改变管段内壁的几何形状以加速气流的一种装置。影响红外导引头作用距离的最重要因素是喷管排气温度和排气离开喷管后所形成的尾焰。二元喷管可以减少尾焰的红外辐射特性,其收敛口是矩形的。路远等<sup>[531]</sup>计算了矩形喷管尾焰红外辐射特性,推导了目标尾焰色比与尾焰温度、辐射传输距离、大气消光系数之间的关系。李喜喜等<sup>[532-533]</sup>研究了轴对称亚声速喷管的红外辐射特性。喷管类型很多,有固定的或可调的收敛-扩散喷管、引射喷管等。朱希娟等<sup>[534]</sup>计算了欠膨胀状态、设计状态和过膨胀状态三种典型流动状态下,轴对称收敛-扩散喷管在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的喷流红外辐射传输特征。刘福城等<sup>[535]</sup>研究了短套管二元引射喷管的红外辐射特性。Fluent 软件是美国 FLUENT 公司推出的流场计算分析程序。冯云松等<sup>[536]</sup>介绍了利用 Fluent6.3 软件对矩形喷管外三维流场进行数值模拟的结果。唐正府等<sup>[537]</sup>讨论了二元喷管加双层遮挡板结构对喷管红外辐射特性的影响。章叶川等<sup>[538]</sup>分析了双 S 弯二元喷管的红外辐射特性。刘常春等<sup>[539]</sup>分析了一种非常规双 S 弯二元喷管的红外辐射特性。

王明波等<sup>[540]</sup>介绍了复杂环境下的目标红外辐射特性测量方法。李建勋等<sup>[541]</sup>在地面试车条件下测试了某型发动机的红外辐射特性。张勃等<sup>[542]</sup>测试了在喷管中加装金属辐射板前后,喷管壁面温度、热喷流温度与喷管红外辐射特性的变化。李明等<sup>[543]</sup>用红外热图技术在地面试验中测量了在典型轨道参数状态下通用航空飞行器表面的热流分布。

在软件实现上有两种途径,一种是完全使用商业计算流体动力学软件;另一种是商业计算流体动力学软件+根据相关算法自编软件,如使用离散传递方法(李翔等<sup>[544]</sup>、徐顶国等<sup>[545]</sup>)、反向蒙特卡洛法(刘常春等<sup>[539]</sup>、施小娟等<sup>[546]</sup>)。

曹春芹等<sup>[547]</sup>介绍了红外成像导弹气动加热仿真建模方法。吴龙宝等<sup>[548]</sup>建立了超音速导弹温度场模

型。刘尊洋等利用 Fluent 软件计算不同飞行参数下的液体火箭尾焰流场<sup>[549]</sup>,定量研究了复燃对液体火箭尾焰<sup>[550]</sup>、固体火箭尾焰<sup>[551]</sup>红外辐射特性的影响。郑才浪等<sup>[552]</sup>研究了固液混合火箭发动机尾焰的红外辐射特性。李心元等<sup>[553]</sup>基于排队方式的突防概率模型,利用 MATLAB 计算了发动机羽流温度以及喷口面积等红外特征对突防概率的影响。孙鹏等<sup>[554]</sup>建立了基于临近空间探测的战术弹道导弹红外辐射特性模型。

刘连伟等<sup>[555]</sup>利用 Fluent 软件计算了完整弹道下末敏弹的非稳态温度。张俊等<sup>[556-559]</sup>建立了在气动加热、内部热源及与环境热交换的综合作用下,末敏弹表面温度场与红外辐射特性的物理模型,实验研究了末敏弹稳态扫描段的红外特性。吕月迎等<sup>[560]</sup>研究了大气传输对飞行弹丸红外辐射特性的影响,设计了飞行弹丸模拟试验平台。

韩玉阁等<sup>[561]</sup>采用动网格方法对车辆运动在地面上留下的热痕迹进行了模拟仿真。成志铎等<sup>[562]</sup>以某钢板为例,建立了目标红外辐射特性的仿真计算模型,并将仿真计算与试验测量的钢板表面温度数据进行了对比。

吴晓航等<sup>[563]</sup>、范晋祥等<sup>[564]</sup>、刘永兰等<sup>[565]</sup>、李小将等<sup>[566]</sup>、胡磊等<sup>[567]</sup>介绍了红外技术在国外天基预警系统的发展和应用情况。邢晖等<sup>[568]</sup>分析了空间跟踪与监视系统预警探测单元的技术特性。吕利明<sup>[569]</sup>介绍了国外导弹预发射红外搜索跟踪系统。李一芒等<sup>[570]</sup>介绍了国外红外战地预警系统的应用与发展。目前,国外先进吊舱采用电视、激光和红外等三个通道共用前端光学系统的方案,即所谓“三光共轴”光电吊舱<sup>[99]</sup>。田浩等<sup>[571]</sup>研究了导航吊舱红外系统中的图像处理技术。

## 7 测试技术

雷萍等<sup>[572]</sup>介绍了在多种温度不同增益下测试噪声等效温差、利用包括神经网络算法在内的多种算法提高分辨图像能力的方法。权清科等<sup>[573]</sup>提出了基于数字图像的噪声等效温差测试方法。赵大鹏等<sup>[79]</sup>建立了偏振成像系统的噪声等效温差模型。王晶等<sup>[574-575]</sup>介绍了红外成像系统动态最小可分辨温差的数学模型,并设计了一套实验装置和实验方法。李军等<sup>[136]</sup>介绍了由扫描速度偏差计算系统运动光学传递函数的算法。卞江等<sup>[576]</sup>介绍了一种测量调制传递函数的改进刀口法。郑婕等<sup>[188]</sup>推导了调焦系统的理想传递函数。

辐射定标是红外系统辐射特性测量的基础。杨林华等<sup>[577]</sup>介绍了国外典型的大型辐射定标设备及技术

指标,描述了定标光学系统、辐射源和机械结构等关键技术的设计思路 and 解决途径。范纪红等<sup>[578]</sup>介绍了成像光谱仪绝对辐射定标技术。黑体参考光源辐亮度精度是决定红外遥感器绝对辐射定标精度的关键因素,徐骏等<sup>[579]</sup>设计了一种直接测量黑体辐亮度的红外标准辐亮度计。曹海源等<sup>[580]</sup>设计了小型高精度红外黑体辐射源。修金利等<sup>[581]</sup>介绍了应用U形边框黑体光阑的三点辐射定标校正方法。胡铁力等<sup>[582]</sup>设计了内部参考黑体温度与环境温度相等的红外辐射计。

钱婧等<sup>[583]</sup>介绍了大型红外辐射面源系统的构成。田昌会等<sup>[584]</sup>探讨了红外辐射对比度概念。罗茂捷等<sup>[585]</sup>采用间接扩展源法对红外系统进行定标。为了从红外图像反演得到目标的辐射特性数据,郭金虎等<sup>[586]</sup>研究了中波红外FPA辐射特性测量的定标问题。韩启金等<sup>[587]</sup>采用一种基于光谱特性均一的多级灰阶靶标在轨定标方法,实现了资源三号卫星的在轨辐射定标。徐娜等<sup>[588]</sup>介绍了FY-2D卫星红外探测器窗区通道非线性特性及其定标订正方案。杨词银等<sup>[589]</sup>分别利用红外单色照明光管和大面源黑体,实现了地基空间目标红外辐射特性测量系统的光谱定标和辐射定标。佟惠原等<sup>[590]</sup>讨论了一种适用于大口径空间滤波调制红外光谱测量系统的辐射定标方法。陈维义等<sup>[591]</sup>研究了双轴旋转靶标式光电测试系统设计问题,介绍了基于该系统的内场测试方法。王继光等<sup>[592]</sup>研究了光电跟踪设备的外场标校方法。乐洪宇等介绍了光电产品的可靠性设计与仿真试验<sup>[593]</sup>。

为了解决红外系统低背景探测性能的测试问题,需要建立一套能够模拟低背景环境的红外冷舱测试系统。石学虎等<sup>[594]</sup>介绍了国外红外冷舱测试系统的发展概况,分析了冷舱系统研制的关键技术、发展途径及设计特点。

## 8 红外系统的作用距离

对于军用红外系统来说,作用距离是最重要的性能参数之一。方义强等计算了晴空背景下地基红外告警系统作用距离<sup>[595]</sup>。易亚星等研究了告警系统作用距离的等效检验问题<sup>[596]</sup>。杨森森等介绍了数字注入式仿真的告警系统作用距离的等效推算<sup>[597]</sup>。乔健<sup>[598]</sup>分析了舰载光电成像系统探测能力。付小宁等<sup>[599]</sup>提出了一种应用非线性校正技术的小温差目标距离估计方法。为了完成在不同气象和飞行条件下,红外搜索跟踪系统对天空背景下快速运动小目标作用距离的等效折算,张乐等<sup>[600]</sup>推导了考虑天空背景辐射的点目标作用距离模型,并利用飞行试验实测数据对模型进行了验证。马鹤等<sup>[518,601]</sup>研究了大气透过率对红

外系统作用距离的影响,提出一种基于离散光谱透过率的红外系统作用距离模型。李心元等<sup>[553]</sup>介绍了导弹红外特性与发现距离关系模型。何建伟等<sup>[602]</sup>分析了红外系统对隐身飞机的探测距离。付强等<sup>[603]</sup>介绍了红外点目标作用距离的建模评估方法。朱斌等<sup>[604]</sup>介绍了地基分布孔径红外系统的作用距离模型。

赵大鹏等分析了偏振成像系统的作用距离<sup>[79]</sup>。路远等研究了飞行器尾焰的被动测距<sup>[531]</sup>。李程华等<sup>[605]</sup>研究了机动平台双站红外测距方法。王东等<sup>[606-607]</sup>介绍了红外侦察告警系统被动测距原理,针对双站被动测距方法的局限性,研究了三站被动测距方法。结合实际应用需要,分析了影响该测距算法测距精度的因素,并给出误差计算公式。针对飞船返回段光学设备不能测距的问题,杨彦伟等<sup>[608]</sup>提出一种基于红外序列图像处理的返回舱被动测距方法。黄浩等<sup>[609]</sup>基于双波段红外识别小目标的有效特征,得出目标红外辐照度与探测距离之间的关系。王晶等<sup>[575]</sup>分析了机载稳瞄系统稳定精度与作用距离之间的关系。宋晓茹等<sup>[235]</sup>介绍了基于粗糙集理论+最小二乘支持向量机模型的稳瞄系统稳定精度检测方法。王忆锋等<sup>[610]</sup>介绍了利用卫星定位数据计算红外探测系统作用距离的方法。苏佳伟等<sup>[611]</sup>分析了距离对红外热像仪测温精度的影响。

## 9 红外隐身

王可众等<sup>[612]</sup>研究了不同粘合剂对涂层发射率的影响。乔加亮等<sup>[613]</sup>介绍了改性环氧树脂的合成及在低发射率涂层上的应用。李少炳等<sup>[614]</sup>以石蜡、丙烯酸单体为原料,采用原位聚合法制备了石蜡微胶囊材料;测试结果表明石蜡微胶囊保留了石蜡的储热性能,达到了红外隐身所要求的较高热焓值。张伟钢等<sup>[615]</sup>报道,以铝粉和青铜粉为复合颜料、聚氨酯为粘合剂制备的复合涂层具有类似一维光子结构特征,其发射率可低至0.186。张焜昆等<sup>[616]</sup>介绍了光子晶体在红外隐身的应用。王超等<sup>[617]</sup>研究了入射角度对远红外与激光兼容伪装光子晶体薄膜特性的影响。陶启宇等<sup>[618]</sup>等指出合成水性聚氨酯胶膜可以应用于隐身涂层。邢宏龙等<sup>[619]</sup>报道,以三氧化二铬包覆片状铝粉粒子为填料、聚碳酸酯基水性聚氨酯为粘合剂制备的涂层达到红外/激光兼容隐身的要求。

动态红外迷彩伪装是一种可控的新型红外伪装手段,可以通过迅速降低目标与背景红外图像帧与帧之间相关度,使红外跟踪系统丢失对地面目标的跟踪。冯云松等<sup>[620]</sup>介绍了基于帕尔帖效应的温度调节型和基于电致变色的发射率调节型动态红外迷彩伪

装技术,并对两种类型的实验样机进行了测试和分析。刘影等<sup>[621]</sup>研究了热致变发射率  $\text{VO}_2$  涂层织物的红外隐身性能。郝立才等<sup>[622]</sup>介绍了红外伪装织物的测试评价方法。

发射率测量是目标红外辐射特性测量的基础。李园园等<sup>[623]</sup>介绍了一种基于环境辐射改变的目标发射率测量方法,该方法通过改变环境辐射测定目标的反射率,进而得到物体的发射率。刘华等<sup>[624]</sup>介绍了毫米级非均匀粗糙表面红外发射率的等温测量装置,导出了基于热电偶+热像仪双重测温的发射率计算公式。闫利等<sup>[625]</sup>指出,利用不同材料的红外发射率差异和镜面反射原理,可以克服普通靶标红外成像的低对比度问题,满足高精度室外几何标定的需要。

朱晨光等<sup>[626]</sup>利用模拟的火箭发动机喷嘴结构测试了端羟基聚丁二烯(HTPB)系复合推进剂的红外和紫外特征信号,分析了二茂铁消光材料对 HTPB 复合推进剂火焰在红外波段和紫外波段的辐射信号衰减能力。为了实现弹道导弹在飞行中段的红外隐身效果,张萍等<sup>[627]</sup>分析了基于深冷介质相变制冷技术的空间冷屏蔽系统。马艳等<sup>[628]</sup>建立了基于 ANSYS 软件的舰船红外辐射特性模型。彭友顺等<sup>[629]</sup>认为过冷降膜是一种简单有效的舰船红外隐身技术。夏舸等<sup>[630]</sup>介绍了基于辐射对比度的变发射率舰船红外隐身方法。

张洁<sup>[631]</sup>介绍了美军通用红外对抗发展计划。淦元柳等<sup>[632]</sup>介绍了国外机载红外诱饵技术的发展。郭冰涛等<sup>[633]</sup>建立了诱饵弹的红外辐射模型。朱敏等<sup>[634]</sup>介绍了红外诱饵弹干扰特性有限元建模方法。黄国炳<sup>[635]</sup>以某红外源校准探测系统设计为例,介绍了一种红外探测系统抗干扰方法。黄炳越等<sup>[636]</sup>以导弹脱靶距离为主要参考值,应用 MATLAB 分析了多种因素对红外诱饵弹干扰效果的影响。林红雪等<sup>[637]</sup>介绍了低燃温红外诱饵剂的设计及其燃烧性能。大面积、高效能和宽光谱的面源型红外干扰弹是抗红外制导武器的一种有效手段。许海龙等<sup>[638]</sup>提出了面源型红外干扰弹的关键技术指标。付晓红等<sup>[639]</sup>对面源红外诱饵进行了建模仿真研究。李石川等<sup>[640]</sup>介绍了地面机动目标的红外诱饵欺骗技术。基于红外目标与诱饵干扰的特征差异,耿利祥等<sup>[641]</sup>提出了一种融合多个特征的改进型联合概率数据关联算法,并利用该算法对抗干扰过程进行了仿真。张思将等<sup>[642]</sup>、李志国等<sup>[643]</sup>研究了基于图像特征的红外对抗干扰效果自动评估方法。陈敏等<sup>[644]</sup>介绍了模拟红外对抗的红外半实物仿真试验。空射诱饵是美国和以色列研制的一种新型空中电子进攻武器。针对空射诱饵的特点,冒燕

等<sup>[645]</sup>提出在浮空器平台上搭载雷达、红外和 GPS 干扰机等装备来进行积极防御。刘旭等<sup>[646]</sup>介绍了浮空红外预警系统。

杜永成等<sup>[647-649]</sup>研究了细水雾遮蔽的红外隐身效果,建立了红外辐射在水雾中的衰减模型,指出基于遮蔽指数的最佳消光粒径要远大于基于光学特性的最佳消光粒径。崔长彬等<sup>[650]</sup>介绍人工水雾对洞库口部有很好的红外遮蔽效果。保石等<sup>[651]</sup>研究了燃烧型炭黑烟幕和红外遮蔽性能。肖凯涛等<sup>[652]</sup>通过开展陆海交界地区红外烟幕干扰野外测试试验,探讨了陆海交界地区大气稳定度变化规律及红外烟幕干扰性能。白玉栋等<sup>[653]</sup>分析了烟幕干扰下红外成像制导导弹的作战效能。李冠蕊等<sup>[654]</sup>、张书浩等<sup>[655]</sup>介绍了面阵烟雾透过率测试系统。吴慧等<sup>[656]</sup>指出石墨烯吸波材料对红外成像系统具有一定的干扰作用。张彤等<sup>[657]</sup>测定了不同空心率纳米空壳材料的红外干扰性能。

## 10 环境辐射特性

孙延奇等<sup>[658]</sup>介绍了地球大气红外辐射特性研究现状。路大举等<sup>[659]</sup>介绍了天空背景光学辐射特性测量。常真瑜等<sup>[660]</sup>以辐射传输理论为基础,综合考虑大气分子的吸收、散射、气象条件以及海拔高度等因素,提出了一种以大气条件为基本参数计算红外成像仿真中大气光谱透过率的方法。刘丹丹等<sup>[661]</sup>计算了中红外波段高空大气传输透过率及热辐射。方义强等<sup>[662]</sup>基于对大气分层的方法得到了天空辐射亮度的计算公式,通过典型数据对大气吸收、散射、透过率、辐射亮度等进行了计算,并与 MODTRAN 软件的计算结果进行了比较。严赵军等<sup>[663]</sup>研究了冰水混合云的红外辐射传输特性。戴聪明等<sup>[664-665]</sup>验证了通用大气辐射传输软件(CART)计算分子吸收和大气散射辐射的精度。

氧气 A 吸收带具有独特的谱线结构,对于火箭羽流或者高温物体的距离探测,氧气 A 吸收带是最佳的距离反演通道。宗鹏飞等<sup>[666-668]</sup>利用该特点,研究了逐线积分算法,设计了氧气 A 带吸收系数及标准光谱计算软件;利用 A 吸收带吸收光谱带外数据,采用多项式拟合方法,实现基线拟合,进而得到带平均透过率。刘丹丹等<sup>[669]</sup>利用逐线积分辐射传输模式,对比分析了 HITRAN 2k、HITRAN 04 和 HITRAN 08 数据库对透过率计算精度的影响。刘丹丹等<sup>[670]</sup>指出使用标准大气模式计算我国典型地区的整层大气透过率存在一定的偏差,其原因来自  $\text{H}_2\text{O}$  分子。王成良等<sup>[671]</sup>通过建立大气中探测路径几何模型,利用 FASCODE 软件计算出路径上  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  和  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  波段大气透过率

和蒙气差并制成图表。通过插值,透过率数据和蒙气差数据可用于系统设计、性能评估和实时仿真。

气溶胶的消光特性通常利用测量透过率来得到。但是在测量过程中,粒子的前向散射和衍射光将到达探测器,增强了透射光,从而导致计算所得到的消光截面积等参数变小。袁忠才等<sup>[672]</sup>引入束效率因子和有效消光截面分析了前向散射和衍射对气溶胶消光特性测量的影响。吉微等<sup>[673]</sup>利用 MODTRAN 模型,输入我国南海区域大气廓线数据,分析了气溶胶对红外波段大气透过特性的影响。

根据大气透射率、路径辐照度、太阳直接辐照度的具体计算需求,张志波等<sup>[674]</sup>提出了 LOWTRAN7 在红外成像仿真中运用的方法,其中对于变化频率不高的大气透射率、路径辐照度直接调用 LOWTRAN7 计算,对于变化频率较高的太阳辐照度采用基于 LOWTRAN7 计算结果进行插值计算。黄涛等<sup>[675]</sup>在红外场景仿真中使用 LOWTRAN、MODTRAN 软件计算大气衰减情况。郭金虎等<sup>[586]</sup>利用 MODTRAN 软件,得到目标和红外探测系统之间的大气传输修正参数。马鹤等<sup>[601]</sup>基于 MODTRAN 软件,建立了波数间隔为  $1\text{ cm}^{-1}$  的离散大气透过率数据库。杨词银等<sup>[589]</sup>通过大气参数测量设备实现目标和地基测量系统之间的大气传输修正。

## 11 红外仿真技术

周方方等<sup>[676]</sup>介绍了国内红外仿真技术的研究现状和发展趋势。范永杰等<sup>[677]</sup>介绍了各类模拟器的基本原理及典型结构,给出了部分关键性能参数如温度分辨率、图像绘制帧频等。帧频反映了仿真系统的实时性。红外导引头要求帧频达到  $30\sim 100\text{ Hz}$ , 导弹预警系统则要求为  $100\sim 400\text{ Hz}$ <sup>[675]</sup>。苏德伦等<sup>[678]</sup>提出了一种红外景像投射系统设计方案,其中采用反射内存网络实现图像数据传输和帧同步;基于 Windows 操作系统的实时扩展 (Real Time eXtension, RTX) 的设计可以保证图像生成在帧同步控制下稳定地以  $200\text{ Hz}$  帧频运行。胡海鹤等<sup>[679]</sup>用数据库存储场景的各类信息;在渲染红外场景时直接访问数据库,从而提高图像帧频,增强仿真实时性。

随着虚拟现实技术的发展,国外出现了不少优秀的三维渲染引擎软件,其中代表性的产品有 OGRE (Object-Oriented Graphics Rendering)、OSG (Open Scene Graph) 等。三维渲染引擎的作用之一是显示三维图形。孙云等<sup>[680]</sup>介绍了基于 GPU (图像处理) + OGRE 的红外场景仿真。郭冰涛等<sup>[633]</sup>基于 OGRE 的场景仿真平台,对红外诱饵弹发射前后地物环境的

变化进行了实时仿真。黄建峰等<sup>[681]</sup>采用基于 OSG 软件,利用目标与背景的几何特征模型、红外辐射特性模型、大气辐射传输模型、探测器光电转换模型、探测器噪声模型等,实现了一个参数可调的红外场景仿真系统。黄涛等<sup>[675]</sup>介绍了一种基于 OSG 软件的红外场景实时仿真方法。Vega 是美国 MultiGen-Paradigm 公司推出的一款仿真软件,可用于虚拟现实、实时视景生成的多种应用。王志刚等<sup>[682]</sup>开展了基于 Vega 的飞机红外成像仿真研究。黄涛等<sup>[675]</sup>介绍了 Vega 标准材质库在红外场景仿真中的应用。黄曦等<sup>[683]</sup>提出了一种基于实测图像与三维数字仿真相结合的红红外图像生成方法,其中利用自研的三维红外场景渲染引擎 PRISSE (Physically Reasonable Infrared Scene Simulation Engine) 生成高真实感红外图像。

余慧娟等<sup>[684]</sup>设计了融参数化模型输入、数据及图像仿真、结果处理与评价、成像显示与存储于一体的地面目标红外成像仿真系统。周方方等<sup>[685]</sup>综合考虑太阳、大气、河流和车辆等环境因素以及桥梁的结构、材质等的影响,使用 ANSYS 软件和 MODTRAN 软件建立桥梁的三维瞬态温度场模型与红外辐射特性模型,分析桥梁的长波红外辐射特性。OpenFlight 是虚拟现实软件中常用的三维场景数据格式。丁伟利等<sup>[686]</sup>介绍了基于 OpenFlight 模型的通用桥梁红外辐射特性模拟方法。Solidworks 是欧美公司推出的一款三维实体造型软件。任亮等<sup>[687]</sup>介绍了基于 ANSYS 软件和 Solidworks 实体建模软件来构建三维目标红外模型的方法。

针对仿真置信度,李珂等<sup>[688]</sup>分析了成像几何扭曲效应,通过寻求各光敏元对应像素点的径向畸变量建立成像扭曲模型,并利用反演方法对畸变图像中的像素灰度值进行估算。为了仿真场景中的红外高光现象,胡海鹤等<sup>[689]</sup>改进了计算机图形学中的可见光光照模型。红外纹理生成是场景红外成像仿真的重要组成部分,柳倩等<sup>[690]</sup>提出了一种草地的红外纹理建模与真实感绘制方法。三维场景中实现水流效果的一种方法是利用各种相关函数来动态计算产生水面特效,如正弦曲面、Bezier 曲面、Gerstner 波等。张思将等<sup>[691]</sup>在动态海面红外视景仿真中采用 Gerstner 波进行海浪波面建模。

何永强等<sup>[692-694]</sup>介绍了一种基于数字微镜器件 (DMD) 的红外场景仿真系统设计方案,利用 DMD 类似闪耀光栅的结构特点,建立了基于 MATLAB 的仿真模型。董明良等<sup>[695]</sup>采用基于 DMD 的红外场景生成器,设计了对红外成像设备进行性能指标验证的内场测试系统。对于大视场光学系统来说,边缘光亮度

降低会很严重,采用反摄远结构因其前组负光焦度产生大的桶形畸变,使得像方视场角减小,可以有效减缓边缘照度下降,像面照度更加均匀。针对双波段制导系统性能测试与评估的需求,张建忠等<sup>[696]</sup>设计了一套基于DMD的双波段视景仿真光学系统,其中采用反摄远结构和谐衍射面结合的方案,解决了由双波段、大出瞳距离和大后工作距带来的系统彗差、像散、畸变以及色差难以平衡的问题;采用柯勒式直接照明的方案,解决了斜入射情况下均匀照明的问题,提高了光能利用率并有效地控制了杂光的影响。张建忠等<sup>[697]</sup>介绍了高对比度中/长波红外双段波视景仿真系统光学设计及测试实验。

电阻列阵红外图像投射器近年来取得突破性进展。电阻列阵在使用之前必须进行非均匀性校正才能满足红外图像生成系统的应用要求。杨春伟等<sup>[698]</sup>介绍了非均匀性校正的流程,针对稀疏网格法和全屏测试法的互补性,提出了改进的全屏测试法。陈宏焯<sup>[699]</sup>介绍了基于电热膜的红外图像模拟。

## 12 结束语

本文所列参考文献总数计有699篇,涵盖了与红外技术相关的各专业领域,从中可以看出国内研发工作的深度和广度。总体上来看,在红外技术领域,2013年国内研究者发表的中文论文在数量上可能已经不少于英语论文数量。纵向与自己比有进步,横向与欧美比有差异或差距。仅是粗略地来看,就可以注意到这样一点,即国内红外技术研发工作中所用工具软件基本上是美国产品。考虑到欧美发达国家至今仍然对中国实施军用红外产品禁运和技术封锁这一事实,不能不承认即使是在学术论文方面,国内业者仍有很大的发展空间。论文在某种程度上是理解力的反映。理解力又是实践力的基础。一个性能优异的红外产品本身就是全面的理解力和先进的实践力两者之间的完美融合。国内军用红外技术的发展不仅需要强大的实践力,也需要深厚的理解力。

(全文完)

## 参考文献:

[509] 陶金,易凡,王攀,等.地球大气系统对红外目标探测影响的分析[J].光学与光电技术,2013,11(5):44-47.  
[510] 马静,刘文清,毛宏霞,等.非均匀下垫面辐照环境对太空目标温度的影响[J].红外与激光工程,2013,42(5):1137-1140.  
[511] 吴晓迪,黄超超,王一程,等.卫星表面散射对其温度及红外特征的影响[J].激光与红外,2013,43(7):753-756.  
[512] 刘莹奇.空间目标红外双波段成像测温[J].光子学报,2013,42(7):845-848.

[513] 刘莹奇.空间目标红外多波段温度分布反演[J].红外与激光工程,2013,42(3):556-561.  
[514] 刘莹奇.空间目标红外双波段比色测温法精度分析[J].应用光学,2013,34(4):648-652.  
[515] 梁国龙,何昕,魏仲慧,等.临近空间目标飞行器地基探测技术研究[J].红外,2013,34(7):1-4.  
[516] 张发强,樊祥,曹翠娇,等.巡航导弹的红外辐射特性研究[J].激光与红外,2013,43(11):1229-1233.  
[517] 赵晨皓,苏伟,赵永,等.空天平台红外探测巡航导弹建模与仿真[J].红外技术,2013,35(9):575-580.  
[518] 马鹤,吴平,孙文芳.基于MODTRAN的红外系统对巡航导弹探测距离的估算[J].红外,2013,34(3):26-31.  
[519] 黄晨,王建军,高昕,等.红外星表在地基红外辐射测量中的应用[J].红外与激光工程,2013,42(11):2901-2906.  
[520] 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(2):14-19.  
[521] 刘连伟,杨森森,樊宏杰,等.反坦克导弹蒙皮温度场的数值计算与分析[J].红外技术,2013,35(7):430-433.  
[522] 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.  
[523] 李建勋,童中翔,王超哲,等.发动机热喷流红外辐射计算与仿真[J].光谱学与光谱分析,2013,33(1):7-13.  
[524] 冯云松,吕相银,凌永顺,等.空中目标蒙皮红外辐射特性的理论计算[J].光电工程,2013,40(2):115-122.  
[525] 冯云松,路远,凌永顺.发射率对飞机蒙皮温度及红外辐射特性的影响[J].红外与激光工程,2013,42(2):294-299.  
[526] 徐顶国,冯维林,桑建华.飞行器后机身蒙皮红外辐射特性(英文)[J].红外与激光工程,2013,42(2):7-13.  
[527] 樊宏杰,刘连伟,许振领,等.空中目标反射辐射特性工程算法[J].红外技术,2013,35(5):289-294.  
[528] 徐顶国,桑建华,罗明东.背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究[J].激光与红外,2013,43(6):649-653.  
[529] 黄全军,刘志成.飞机后向红外隐身技术应用探讨[J].飞机设计,2013(1):10-14,34.  
[530] 张志波,童中翔,王超哲,等.视线方向飞机红外辐射特性建模与仿真[J].激光与红外,2013,43(8):890-895.  
[531] 路远,冯云松,凌永顺,等.飞行器尾焰红外辐射及其被动测距[J].红外与激光工程,2013,42(7):1660-1664.  
[532] 李喜喜,额日其太.用可变扩散湍流模型研究轴对称排气系统红外辐射特性[J].推进技术,2013(3):289-293.  
[533] 李喜喜,额日其太,朱希娟,等.用温度修正的 $k-\epsilon$ 模型研究排气系统红外辐射特性[J].航空动力学报,2013(9):1942-1948.  
[534] 朱希娟,李霞,王俊,等.三种典型流动状态下的喷流红外辐射特性[J].红外与激光工程,2013,42(4):850-856.  
[535] 刘福城,吉洪湖,斯仁,等.短套管二元引射喷管设计及气动与红



- 外特性数值研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(10): 623-628.
- [536] 冯云松, 李晓霞, 路远, 等. 矩形喷管外尾焰红外辐射特性的数值计算[J]. 兵工学报, 2013, **34**(4): 437-442.
- [537] 唐正府, 王杏涛, 单勇, 等. 遮挡板参数对二元喷管气动和红外辐射影响[J]. 航空计算技术, 2013(3): 85-88.
- [538] 章叶川, 王占学, 史经纬, 等. 双S弯喷管流动特性及红外辐射特性分析[J]. 航空动力学报, 2013(11): 2468-2474.
- [539] 刘常春, 吉洪湖, 黄伟, 等. 一种双S弯二元喷管的红外辐射特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2013(7): 1482-1488.
- [540] 王明波, 刘颖. 复杂环境下的红外目标特性测量方法研究[J]. 红外, 2013, **34**(6): 29-33.
- [541] 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.
- [542] 张勃, 吉洪湖, 黄伟, 等. 辐射板强化喷管换热与红外抑制效果试验研究[J]. 推进技术, 2013(4): 445-450.
- [543] 李明, 杨彦广, 祝智伟. 利用红外热图开展通用航空飞行器气动热特性试验[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 285-289.
- [544] 李翔, 杨青真, 陈立海, 等. 航空发动机排气喷管红外辐射特征数值研究[J]. 航空工程进展, 2013(1): 126-133.
- [545] 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.
- [546] 施小娟, 吉洪湖, 斯仁, 等. 涡扇发动机轴对称分开和混合排气系统红外辐射特征的对比[J]. 航空动力学报, 2013(8): 1702-1710.
- [547] 曹春芹, 向静波, 张晓阳, 等. 红外成像导弹气动加热仿真建模方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(8): 1951-1955.
- [548] 吴龙宝, 谢晓方, 王诚成, 等. 超音速导弹温度场建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 1-6.
- [549] 刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, **33**(4): 9-15.
- [550] 刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 复燃对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光子学报, 2013, **42**(4): 480-485.
- [551] 刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. 光学学报, 2013, **33**(6): 40-47.
- [552] 郑才浪, 朱定强, 乔要宾. 固液混合火箭发动机尾焰的红外特性研究[J]. 红外, 2013, **34**(10): 26-30, 36.
- [553] 李心元, 程养民, 李怀念, 等. 固体战术导弹红外辐射特性对突防效能的影响[J]. 战术导弹技术, 2013(2): 42-46.
- [554] 孙鹏, 杨建军, 赵保军, 等. 基于临近空间探测的 TBM 红外辐射特性研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, **14**(1): 35-39.
- [555] 刘连伟, 杨淼淼, 许振领, 等. 末敏子弹非稳态红外辐射特性数值仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 857-862.
- [556] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 末敏弹减速减旋段表面温度与辐射特性[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 311-316.
- [557] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 飞行弹丸表面温度的两种数值计算方法[J]. 南京理工大学学报, 2013, **37**(4): 585-589.
- [558] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 高速旋转飞行弹丸外弹道表面温度场研究[J]. 兵工学报, 2013, **34**(4): 425-426.
- [559] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 末敏弹稳态扫描段红外特性的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11): 2876-2881.
- [560] 吕月迎, 安莹. 飞行弹丸红外辐射特性模拟测试研究[J]. 计量与测试技术, 2013, **40**(3): 30-32, 34.
- [561] 韩玉阁, 成志铎, 任登凤, 等. 装甲车辆与地面背景的热交互作用及红外仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 20-25.
- [562] 成志铎, 李明博, 李健, 等. 目标与背景的红外辐射特性仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2336-2340.
- [563] 吴晓航, 黄树彩, 肖科, 等. 红外探测技术在导弹防御系统中的应用与发展[J]. 飞航导弹, 2013(5): 44-49.
- [564] 范晋祥, 郭云鹤. 美国导弹防御系统全域红外探测装备的发展、体系分析和能力预测[J]. 红外, 2013, **34**(1): 1-9.
- [565] 刘永兰, 贺正洪, 刘进忙, 等. 国外预警卫星系统的发展[J]. 飞航导弹, 2013(3): 51-56.
- [566] 李小将, 金山, 廖海玲, 等. 美军 SBIRS GEO-1 预警卫星探测预警能力分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(1): 3-8.
- [567] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 HEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 装备学院学报, 2013, **24**(3): 76-80.
- [568] 邢晖, 雷萍, 刘荣, 等. 空间跟踪与监视系统预警探测单元的技术特性分析[J]. 光电工程, 2013, **40**(8): 29-35.
- [569] 吕利明. 国外导弹预发射红外搜索跟踪系统综述[J]. 飞航导弹, 2013(6): 50-53.
- [570] 李一芒, 何昕, 魏仲慧, 等. 光学无源战地预警系统的应用与发展[J]. 红外, 2013, **34**(4): 1-6.
- [571] 田浩, 王铮, 高宇. 一种红外图像处理系统的设计与实现[J]. 价值工程, 2013, **32**(1): 197-199.
- [572] 雷萍, 吴文华, 朱祺. 热成像设备测试方法的实验及分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(9): 1017-1020.
- [573] 权清科, 仇振安, 崔志新. 红外成像系统噪声等效温差数字图像测试方法[J]. 光电与控制, 2013, **20**(9): 102-104.
- [574] 王晶, 纪明, 敬鸣, 等. 动态红外成像系统 MRTD 的测试与分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(5): 526-531.
- [575] 王晶, 纪明, 张冲, 等. 机载稳瞄系统稳定精度与视距关系的研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(9): 1030-1035.
- [576] 卞江, 马冬梅, 孙鸽, 等. 红外光电成像系统 MTF 测试技术分析[J]. 应用光学, 2013, **34**(5): 748-753.
- [577] 杨林华, 肖庆生, 蒋山平. 红外遥感器辐射定标技术概述[J]. 航天器环境工程, 2013(1): 34-39.
- [578] 范纪红, 赵生禄, 占春连, 等. 成像光谱仪绝对辐射定标技术研究[J]. 应用光学, 2013, **34**(4): 629-632.
- [579] 徐骏, 孟炳寰, 郑小兵, 等. 红外标准辐亮度计的研制及定标[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 863-868.
- [580] 曹海源, 万强, 初华, 等. 小型高精度红外黑体辐射源的设计[J]. 电

- 光与控制, 2013, **20**(12): 63-67.
- [581] 修金利, 金伟其, 刘崇亮, 等. 应用 U 形边框黑体光阑的三点辐射定标校正方法及其分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2313-2318.
- [582] 胡铁力, 申越, 郭羽, 等. 低噪声红外辐射计设计[J]. 应用光学, 2013, **34**(4): 663-666.
- [583] 钱婧, 孙胜利, 于胜云, 等. 大型红外辐射面源的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 31-35.
- [584] 田昌会, 蔡明, 王斌科, 等. 红外辐射对比度概念的探讨[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013(4): 81-83.
- [585] 罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 36-40.
- [586] 郭金虎, 张云峰. 中波红外焦平面列阵的辐射特性测量研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, **21**(6): 1480-1482.
- [587] 韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 167-173.
- [588] 徐娜, 陈林, 胡秀清, 等. FY-2D 红外探测器窗口通道非线性特性及其定标订正方案[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(4): 337-343.
- [589] 杨词银, 张建萍, 曹立华. 地基空间目标红外辐射特性测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, **34**(2): 304-310.
- [590] 佟惠原, 马勇辉, 逯伟, 等. 大口径空间滤波调制红外光谱仪定标方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(3): 569-573.
- [591] 陈维义, 许中胜, 邱海华. 双轴旋转靶标式光电测试系统设计[J]. 光学与光电技术, 2013, **11**(4): 41-44.
- [592] 王继光, 李金亮, 白云塔, 等. 集成化光电靶标对光电跟踪设备标校方法研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(2): 9-12.
- [593] 乐洪宇, 李朝荣, 李永, 等. 光电产品的可靠性设计与仿真试验[J]. 激光与红外, 2013, **43**(3): 291-296.
- [594] 石学虎, 武晓阳, 王英瑞. 国外低背景红外冷舱测试系统综述[J]. 电光与控制, 2013, **20**(3): 53-56.
- [595] 方义强, 樊祥, 程正东, 等. 晴空背景下地基红外告警系统作用距离[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7): 1654-1659.
- [596] 易亚星, 乐开端, 吴军辉, 等. 红外告警设备作用距离的等效检验[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 7-11.
- [597] 杨森森, 刘连伟, 许振领, 等. 数字注入式仿真的红外侦察告警系统作用距离等效推算[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7): 1674-1679.
- [598] 乔健. 舰载光电成像系统探测能力分析[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(10): 2520-2526.
- [599] 付小宁, 王洁, 杨琳. 基于红外光谱分析的小温差物体距离估计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(1): 51-54.
- [600] 张乐, 梁冬明, 姚梅, 等. 红外搜索跟踪系统作用距离等效折算[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 26-30.
- [601] 马鹤, 吴平, 赵煜. 一种基于离散光谱透过率的红外探测距离模型研究[J]. 应用光学, 2013, **34**(3): 532-536.
- [602] 何建伟, 曹晨, 张昭. 红外系统对隐身飞机的探测距离分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(11): 1243-1247.
- [603] 付强, 史广维, 张新. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(8): 1991-1996.
- [604] 朱斌, 樊祥, 程正东. 地基分布孔径红外系统的作用距离模型[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11): 2871-2875.
- [605] 李程华, 宋刘非. 机动平台双站红外测距方法研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(5): 73-77.
- [606] 王东, 赵威, 梁冬明, 等. 红外告警系统三站被动测距目标确认及精度分析[J]. 应用光学, 2013, **34**(2): 336-340.
- [607] 王东, 成斌, 梁冬明, 等. 基于红外侦察告警系统的三站被动测距方法分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(6): 645-648.
- [608] 杨彦伟, 徐蓉, 甘宸伊, 等. 基于红外图像的返回舱被动测距[J]. 飞行器测控学报, 2013, **32**(4): 331-335.
- [609] 黄浩, 陶华敏, 陈尚锋. 空间双波段红外成像仿真及目标特性分析[J]. 红外技术, 2013, **35**(8): 482-486.
- [610] 王忆锋, 王丹琳. 利用卫星定位数据计算红外探测系统的作用距离[J]. 红外, 2013, **34**(7): 5-8.
- [611] 苏佳伟, 石俊生, 汪炜韬. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(9): 587-590.
- [612] 王可众, 王潮霞. Al/ZnS 涂层织物的红外发射性能[J]. 精细化工, 2013(8): 944-947.
- [613] 乔加亮, 徐国跃, 丁儒雅, 等. 改性环氧树脂的合成及在低红外发射率涂层上的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2013(10): 68-71.
- [614] 李少炳, 景文斌, 徐亮, 等. 红外隐身用石蜡微胶囊的制备与表征[J]. 功能材料, 2013(7): 1034-1038.
- [615] 张伟钢, 徐国跃, 段凯歌, 等. 聚氨酯/复合金属颜料涂层的制备及红外发射率[J]. 材料研究学报, 2013(1): 49-52.
- [616] 张堰昆, 于名讯, 潘士兵, 等. 光子晶体红外隐身材料研究进展[J]. 激光与红外, 2013, **43**(9): 967-971.
- [617] 王超, 时家明, 赵大鹏, 等. 入射角度对远红外与激光兼容伪装光子晶体薄膜特性的影响研究[J]. 人工晶体学报, 2013(4): 635-638.
- [618] 陶启宇, 邢宏龙, 郭文美, 等. 热红外隐身涂料用水性聚氨酯的制备研究[J]. 涂料工业, 2013(2): 31-34, 38.
- [619] 邢宏龙, 郭文美, 陶启宇, 等. 聚氨酯基红外-激光兼容隐身涂层性能研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(7): 761-765.
- [620] 冯云松, 范彬, 李亮. 动态红外迷彩伪装的机理与实现[J]. 现代防御技术, 2013(2): 51-55.
- [621] 刘影, 王薇, 钟毅, 等. 热致变发射率 VO<sub>2</sub> 涂层织物的红外隐身性能研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(6): 639-644.
- [622] 郝立才, 肖红, 刘卫. 织物热红外伪装性能测试评价技术现状[J]. 红外技术, 2013, **35**(8): 512-517.
- [623] 李园园, 屈惠明, 刘文俊. 基于环境辐射的现场目标发射率测量方法研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(3): 272-275.
- [624] 刘华, 艾青, 夏新林, 等. 毫米级非均匀粗糙表面红外发射率测量[J]. 工程热物理学报, 2013(2): 317-319.



- [625] 闫利, 胡修兵, 陈长军, 等. 中波红外几何标定场靶标定制问题研究[J]. 测绘地理信息, 2013(4): 39-41, 44.
- [626] 朱晨光, 郑亭亭, 吕惠平, 等. 二茂铁基复合推进剂红外/紫外低特征信号应用研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 449-453.
- [627] 张萍, 李超, 陈叔平. 对冷屏蔽结构设计分析[J]. 低温与超导, 2013, **41**(7): 22-25, 67.
- [628] 马艳, 田宇. 红外仿真中舰船辐射模型建模方法[J]. 战术导弹技术, 2013(3): 67-70, 75.
- [629] 彭友顺, 张晓怀, 杨立, 等. 竖壁液膜温度分布数值模拟和红外抑制效果[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013(2): 131-136.
- [630] 夏舸, 杨立. 基于辐射对比度的变发射率舰船的红外隐身研究[J]. 红外, 2013, **34**(7): 34-38.
- [631] 张洁. 美军通用红外对抗系统技术的发展[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(1): 7-11, 65.
- [632] 淦元柳, 蒋冲, 刘玉杰, 等. 国外机载红外诱饵技术的发展[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(6): 13-17, 39.
- [633] 郭冰涛, 王晓蕊, 黄曦, 等. 地物环境对红外诱饵弹散射特性建模及仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 300-304.
- [634] 朱敏, 陈宇, 杨春玲. 红外诱饵弹干扰特性有限元建模[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(8): 1979-1986.
- [635] 黄国炳. 红外校准装置探测系统设计[J]. 航空兵器, 2013(2): 38-41, 45.
- [636] 黄炳越, 周智超, 吴晓锋, 等. 基于 Matlab 仿真工具的隐身舰艇红外质心干扰效果评估[J]. 计算机与数字工程, 2013, **41**(6): 882-886.
- [637] 林红雪, 朱晨光, 江泉南, 等. 低燃温红外诱饵剂设计及其燃烧性能研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(10): 654-658.
- [638] 许海龙, 王隼, 吴雪峰. 面源型红外干扰诱饵干扰红外成像制导反舰导弹研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, **36**(1): 43-46.
- [639] 付晓红, 樊秋林, 等. 面源红外诱饵的建模与仿真研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(6): 81-86.
- [640] 李石川, 张同来, 李黎华, 等. 地面机动目标的红外诱饵欺骗技术研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(11): 727-731.
- [641] 耿利祥, 陈钱, 钱惟贤. 改进的联合概率数据关联算法(JPDA)对红外目标与诱饵的辨别[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 305-310.
- [642] 张思将, 刘攀龙. 红外对抗干扰效果自动评估方法研究[J]. 光学与光电技术, 2013, **11**(3): 74-77.
- [643] 李志国, 张思将, 周建忠. 基于图像特征的红外对抗干扰效果评估方法研究[J]. 激光技术, 2013, **37**(3): 413-416.
- [644] 陈敏, 李龙. 红外对抗及其半实物仿真试验研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(6): 377-380.
- [645] 冒燕, 余国文, 郁春来. 浮空器平台在对空射诱饵防空预警中的应用[J]. 飞航导弹, 2013(5): 29-32.
- [646] 刘旭, 李为民, 别晓峰. 浮空红外探测系统预警高动态目标性能分析[J]. 红外技术, 2013, **35**(12): 788-792.
- [647] 杜永成, 杨立, 张文勇. 动态细水雾的最佳热辐射消光粒径[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(9): 2413-2417.
- [648] 杜永成, 杨立, 彭友顺, 等. 水雾热遮蔽过程的辐射与导热耦合换热[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(1): 40-43, 79.
- [649] 杜永成, 杨立, 张士成. 细水雾遮蔽红外辐射的数值分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(8): 1967-1972.
- [650] 崔长彬, 康青, 夏雪, 等. 遮障后洞库口部的水雾红外伪装性能分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 1-6.
- [651] 保石, 周冶, 张紫浩, 等. 燃烧型炭黑烟幕红外遮蔽性能研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(5): 85-88.
- [652] 肖凯涛, 宋伟伟, 何友金, 等. 基于陆海交界地区特征的红外烟幕干扰性能研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(2): 113-118.
- [653] 白玉栋, 吴涛. 烟幕干扰下红外成像制导导弹的作战效能分析[J]. 红外, 2013, **34**(5): 39-41, 45.
- [654] 李冠蕊, 王茜蓓, 张书皓, 等. 基于 LabVIEW 的面阵烟雾透过率测试系统[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 186-191.
- [655] 张书瀚, 王茜蓓, 李冠蕊, 等. 羽烟面阵透过率测量系统峰值保持电路研究[J]. 光学技术, 2013, **39**(4): 318-322.
- [656] 吴慧, 马拥军, 朱东升, 等. 石墨烯基纳米红外吸波材料的制备及消光性能研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(4): 242-246.
- [657] 张彤, 代晓东, 任丽娜, 等. 纳米空壳材料的空心率及其红外干扰性能[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 93-97.
- [658] 孙延奇, 蒋奇材, 范彩平. 地球大气红外辐射特性研究现状[J]. 红外, 2013, **34**(10): 7-9.
- [659] 路大举, 杨锐, 张波, 等. 天空背景光学辐射特性测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(S1): 51-54.
- [660] 常真瑜, 康昌盛, 李晓冬. 一种有效计算大气红外辐射传输效应的方法[J]. 电子制作, 2013(2): 68-69.
- [661] 刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 中红外波段高空大气传输透过率及热辐射计算[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2324-2329.
- [662] 方义强, 樊祥, 程正东, 等. 天空大气背景红外辐射建模与计算[J]. 激光与红外, 2013, **43**(8): 896-902.
- [663] 严赵军, 韩芳芳, 易凡, 等. 冰水混合云红外辐射传输特性研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(1): 56-60.
- [664] 戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)分子吸收和热辐射计算精度验证[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 174-180.
- [665] 戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(6): 1575-1581.
- [666] 宗鹏飞, 张记龙, 王志斌, 等. 氧气 A 带红外辐射不同路径透过率的仿真分析[J]. 激光与红外, 2013, **43**(2): 171-175.
- [667] 宗鹏飞, 王志斌, 张记龙, 等. 基于红外被动测距的基线拟合算法研究[J]. 激光技术, 2013, **37**(2): 174-177.
- [668] 宗鹏飞, 王志斌, 陈媛媛, 等. 基于氧气 A 吸收带的 baseline 拟合距离反演算法[J]. 光散射学报, 2013, **25**(1): 79-84.
- [669] 刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 不同版本 HITRAN 数据库中红外波段上行传输透过率的计算[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7):

- 1776-1782.
- [670] 刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 我国典型地区大气透过率的计算分析[J]. 大气与环境光学学报, 2013, **8**(4): 262-270.
- [671] 王成良, 胡胜敏, 饶鹏. 静止轨道卫星红外探测大气透过率与蒙气差分析[J]. 光学与光电技术, 2013, **11**(4): 33-36.
- [672] 袁忠才, 林志丹, 赵大鹏. 前向散射和衍射对气溶胶消光特性测量的影响[J]. 激光与红外, 2013, **43**(1): 34-37.
- [673] 吉微, 齐琳琳, 安洁. 南海区域红外波段大气透过特征分析[J]. 海洋技术, 2013, **32**(1): 56-59.
- [674] 张志波, 童中翔, 王超哲, 等. Lowtran 在红外成像仿真中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2013, **30**(7): 24-26, 31.
- [675] 黄涛, 明德烈, 揭斐然, 等. 一种实时红外场景仿真方法[J]. 计算机与数字工程, 2013, **41**(1): 121-123.
- [676] 周方方, 司斌, 王晖, 等. 红外图像仿真的发展综述[J]. 航空兵器, 2013(2): 29-32, 37.
- [677] 范永杰, 金伟其, 朱丽红. 红外场景辐射模拟技术发展[J]. 红外技术, 2013, **35**(3): 133-138.
- [678] 苏德伦, 张金生, 廖守亿. 基于 RTX 和反射内存的红外景象投射系统实时性设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(5): 1117-1122.
- [679] 胡海鹤, 郭长庚, 胡海燕. 基于数据库查找表技术的实时红外场景仿真[J]. 红外技术, 2013, **35**(6): 329-333, 344.
- [680] 孙云, 李晓燕, 李敏. GPU 结合 OGRE 技术在红外场景仿真中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2013(8): 1935-1939.
- [681] 黄建峰, 范小礼, 王俊. 基于 OSG 的红外动态场景仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S1): 18-23.
- [682] 王志刚, 付欣, 尚举邦. 基于 Vega 的红外目标成像仿真研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(3): 73-76.
- [683] 黄曦, 张建奇, 张绍泽, 等. 目标高真实感红外图像生成方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 1084-1088.
- [684] 余慧娟, 黎兰, 刘相新, 等. 地面目标红外成像仿真系统的设计与实现[J]. 红外技术, 2013, **35**(1): 31-37.
- [685] 周方方, 司斌, 王晖, 等. 基于 ANSYS 的桥梁长波红外建模仿真[J]. 红外技术, 2013, **35**(2): 107-112.
- [686] 丁伟利, 王露. 基于 OpenFlight 模型的通用桥梁红外辐射特性模拟方法[J]. 光电工程, 2013, **40**(10): 54-62.
- [687] 任亮, 陈钱, 钱惟贤. 基于 ANSYS 的目标红外特性建模与仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(6): 1426-1431.
- [688] 李珂, 王学伟, 王世立. 红外凝视成像几何扭曲效应建模和仿真[J]. 半导体光电, 2013, **34**(1): 148-150.
- [689] 胡海鹤, 白廷柱, 韩强, 等. 基于 Blinn-Phong 模型的红外辐照模型及其红外场景仿真[J]. 光学学报, 2013, **33**(6): 88-94.
- [690] 柳倩, 朱枫, 郝颖明, 等. 草地的红外纹理建模与真实感绘制方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 1100-1105.
- [691] 张思将, 白玉栋, 李志国. 动态海面红外视景仿真研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(6): 636-638.
- [692] 何永强, 唐德帅, 胡文刚, 等. 基于 DMD 的红外场景仿真系统光学性能分析[J]. 红外技术, 2013, **35**(2): 97-101.
- [693] 何永强, 唐德帅, 王龙, 等. DMD 衍射特性及其在红外场景仿真中的应用[J]. 激光与红外, 2013, **43**(8): 935-938.
- [694] 何永强, 唐德帅, 胡文刚. 基于 DMD 的红外场景仿真系统投影光路消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2319-2323.
- [695] 董明良, 李航宇, 林涛. 红外成像设备内场测试系统设计[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(3): 8-10, 31.
- [696] 张建忠, 杨乐, 郭帮辉, 等. 基于衍射的红外中波/长波双波段视景仿真光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7): 1758-1764.
- [697] 张建忠, 郭帮辉, 谭向全, 等. 高对比度中/长波红外双波段视景仿真系统光学设计及测试实验[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11): 2894-2900.
- [698] 杨春伟, 廖守亿, 苏德伦, 等. 电阻阵列非均匀性测试与校正[J]. 红外技术, 2013, **35**(6): 345-349.
- [699] 陈宏烨. 基于电热膜的红外图像模拟[J]. 红外技术, 2013, **35**(10): 650-653.