

# 基于模拟材料的地表景物光学特性模拟 关键技术研究

谷建光<sup>1,2</sup>, 张凤林<sup>2</sup>, 周旭<sup>2</sup>, 程海峰<sup>1</sup>, 张朝阳<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 63918 部队, 北京 100028)

**摘要:**研究了光学特性模拟材料设计技术与人工景象区设计技术, 构建了设计结果的试验验证体系。成果成功应用于光学成像系统的成像性能考核试验, 对提高试验保障能力和模拟材料普及应用具有重要意义。

**关键词:**光学特性模拟材料; 人工景象匹配区; 光学成像系统; 等效性设计

**本文引用格式:**谷建光, 张凤林, 周旭, 等. 基于模拟材料的地表景物光学特性模拟关键技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017(3): 147-151.

**Citation format:** GU Jian-Guang, ZHANG Feng-lin, ZHOU Xu, et al. Research on Optical Properties Equivalence Simulation of Surface Object Based on Simulation Materials[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(3): 147-151.

中图分类号: TJ06; TN213

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)03-0147-05

## Research on Optical Properties Equivalence Simulation of Surface Object Based on Simulation Materials

GU Jian-Guang<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng-lin<sup>2</sup>, ZHOU Xu<sup>2</sup>,  
CHENG Hai-Feng<sup>1</sup>, ZHANG Chao-Yang<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. The No. 63918<sup>th</sup> Troop of PLA, Beijing 100028, China)

**Abstract:** The design of optical properties of simulation materials and the design technologies of artificial scene matching were studied, and the system of test and verification of artificial scene region were constructed. The study of this paper has been used successfully in optical imaging system tests, and it is very important for the support of optical imaging system tests and the widespread use of simulation materials.

**Key words:** optical properties simulation material; artificial scene matching; optical imaging system; equivalence design

光学成像系统广泛应用于卫星、飞机等各种飞行器上, 其通过对地面或海面景物的成像, 给飞行器提供实时图像信息。随着技术发展和应用推动, 在光学成像系统试验场构建与真实地物等效的地面模拟景物, 通过获取光学成像信息对各类光学成像系统的成像性能进行试验考核, 是目前越来越紧迫的装备试验需求。

考虑净化试验环境, 减少地杂波干扰等因素, 光学成像

系统试验场通常选在地表景物较为单一的人烟稀少地域。如果在试验场建造相当数量和规模的地面三维实体模拟景物, 存在以下突出问题: 一是设施工程量大, 所投入的工程建设及使用维护经费巨大, 难以付诸实施; 二是工程施工周期长且易受季节等外在因素影响, 难以确保试验进度; 三是实体设施一次建成无法更改, 无法实现模拟景物规模布局的对应调整以满足对不同的地物背景模拟需求, 难以实现所建设

收稿日期: 2016-10-28; 修回日期: 2016-11-25

作者简介: 谷建光(1972—), 男, 博士, 工程师, 主要从事装备试验技术研究。

施的重复利用,在满足不同试验需求、充分考虑成像系统性能方面存在“瓶颈”。

基于上述问题及需求,借鉴并综合国内外模拟材料使用经验<sup>[1-2]</sup>,深入研究在地表景物单一条件下,用模拟材料实现对地物的等效模拟技术。充分发挥模拟材料质轻、耐用等适合大规模应用特点,构建光学人工景象匹配区,实现对真实地物的几何和光学特性等效模拟,满足光学成像系统性能考核需求,同时实现低成本、利用率高等场区试验设施保障目标。

国外通过在金属、木材、布等材料表面涂覆不同光学反射特性、不同发射率的涂料,形成一定的辐射温度差,模拟真实物体的红外辐射特征与外形特征<sup>[3-6]</sup>,具体在无人靶机<sup>[7]</sup>、模拟大型地面目标(图1)等方面广泛应用。我国模拟材料研究起步较晚,尤其目前在大面积场景光学特性等效方面研究应用很少,需要深入开展相关研究工作<sup>[8-10]</sup>。

## 1 光学特性模拟材料设计技术

自然环境中不同的地表景物,由于自身理化特性差异及环境影响,导致产生不同特性的辐射温差和可见光对比度,且在昼夜24 h内的变化规律不同;对于同一地物,在昼夜时间内它与背景的光学特性差也不同<sup>[11-13]</sup>。



图1 白沙导弹试验靶场的地面涂层布模拟目标

根据模拟材料工作原理,计算不同发射率材料与试验场背景在不同高度下的辐射温差,当模拟材料实际温度比地面背景高9K时,结果如表1所示,随着材料发射率的变化,二者辐射温差可在 $-40.34 \sim +12.83\text{K}$ 变化。因此,在现有成熟的伪装网技术基础上,通过涂覆不同光学反射特性、红外辐射特性涂层,辅以材料颜色、表面粗糙程度等特征,得到具有不同光学特性的模拟材料,可实现对真实地表景物的辐射温差和可见光对比度变化规律的等效模拟,图2选定的部分光学特性模拟材料样品外观。

表1 模拟材料与试验场地面背景的辐射温差计算结果

模拟材料热 红外发射率	$\theta = 0^\circ$ , 材料与地物相距远			$\theta = 30^\circ$ , 材料与地物靠近		
	材料辐射温度	背景辐射温度	辐射温差	材料辐射温度	背景辐射温度	辐射温差
0.1	258.83	299.17	-40.34	264.62	299.39	-34.77
0.2	266.49	299.17	-32.68	271.23	299.45	-28.22
0.4	279.99	299.17	-19.18	283.10	299.58	-16.48
0.6	291.78	299.17	-7.39	293.64	299.71	-6.07
0.8	302.35	299.17	3.18	303.20	299.84	3.36
1	312.00	299.17	12.83	312.00	299.97	12.03

注: $\theta$ 为模拟材料平面与水平面的夹角;温度单位K。

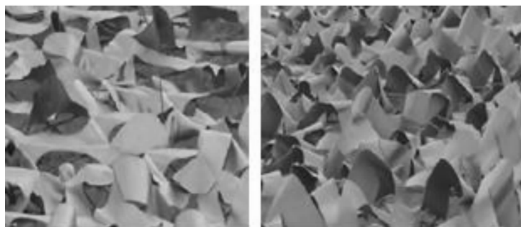


图2 选定的部分光学特性模拟材料样品外观

针对地面建筑、道路、植被等常见景物的光学特性及变化规律,经仿真分析和试验研究,选择确定了多种颜色、多个发射率梯度的模拟材料,如表2所示。使用中,通过PcModWin 4.0软件等数值仿真手段(图3),充分考虑大气传输、地面传热、地面风阻和材料辐射强度等影响因素,确定最优模拟材料铺设高度。

表2 选定的光学特性模拟材料红外、可见光特性

型号	颜色	发射率(×I0)	亮度(×S0)	模拟物
1	黑	0.91 ± 0.033	1.0 ± 10%	光照较少道路、建筑物等
2	银白	0.50 ± 0.033	8.2 ± 10%	金属或含金属类物体
3	红	0.89 ± 0.033	5 ± 10%	较高建筑物顶部
4	...	...	...	...

注:I0为基准发射率;S0为基准亮度;L0为基准长度。基准参数用于对数据进行无量纲化处理,下同。

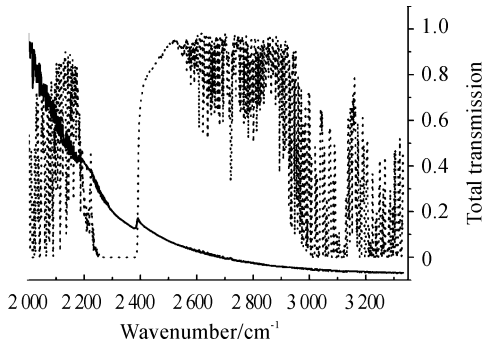


图3 发射率0.441<sup>0</sup>模拟材料辐射强度和辐射传输曲线

## 2 人工景象区设计技术

在确定模拟材料类型,完成光学特性模拟材料设计基础上,需要根据真实地物与背景的尺寸、相对位置关系等,确定光学人工景象匹配区规模和布局图案特征,实现对特定地物的等效模拟。

### 1) 规模等效性

人工景象区规模,理论上等于成像系统视场所覆盖的地物背景区域范围,但由于成像系统高度误差、视场位置误差和姿态角误差等因素影响,视场通常会发生随机偏移<sup>[14]</sup>。图4(a)为视场理论范围与实际范围关系,视场实际范围为4个方向误差极限情况下的视场叠加结果,其将大于理论视场范围。无论随机误差情况如何,4种误差情况叠加形成的公共区域为视场必扫区域(图4(c))。在成像系统进行目标成像识别过程中,视场范围逐步缩小(图4(b)),该公共区域被视场扫过的频次较高。建立成像系统误差模型并计算出公共区域范围的量化结果,作为人工景象区规模确定的参考依据。在此基础上结合成像系统视景建模半实物仿真试验,最终确定并实现人工景象区规模的等效优化。

### 2) 布局等效性

真实地物背景区域中,规模不同单体地物在成像系统图像中的成像分辨率不同,Johnson识别准则下地物的可分辨性与成像线对数间对应关系如表3所示。地物的可分辨性由低到高分可为可探测、可识别和可辨认3个等级,地物规模

越大,对应线对数越多,地物所成像素越多,其可分辨性越好。

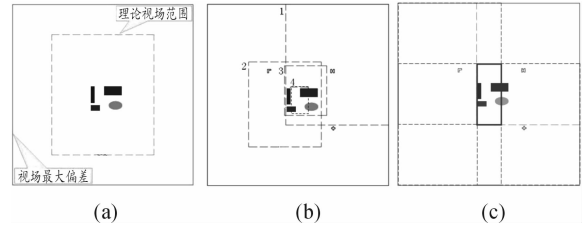


图4 成像系统视场变化过程及一定高度下的视场公共区域

表3 Johnson识别准则下的单体地物可分辨性量化范围

目标可分辨性能	50%概率的线对数	≥95%概率的线对数
探测	1.0 ± 0.25	2.0 ± 1
识别	4.0 ± 0.8	8.0 ± 1.6
辨认	6.4 ± 1.5	12.8 ± 3

量化计算地物背景中各单体地物的可分辨性能,提取达到可识别层次以上的单体纹理特征,忽略可探测层次的规模较小单体地物。实现景物主要特征提取,按照真实相对位置关系进行布局,得到人工景象区布局图案。

## 3 设计结果试验验证体系

模拟材料和人工景象区设计中,以及人工景象区建设完成后,开展了实验室、外场等一系列试验以及视景建模半实物仿真计算等。这些工作从目的和功能上,涵盖课题研究的可行性分析、设计调整和结果验证,构成完整的设计结果验证体系,为整个课题研究提供重要的技术支撑,如表4所示。

## 4 设计实例

以某成像系统的成像性能考核为例,应用研究成果进行了试验场人工景象匹配区构建。

### 1) 规模等效

该成像系统理论视场范围约为 1.1L0 × 0.85L0,视场最大偏差下覆盖范围约 1.5L0 × 1.5L0 区域,视场公共区域面积为 0.7L0 × 0.2L0 长方形区域,作为人工景象区规模确定参考依据。

### 2) 布局等效

对 0.7L0 × 0.2L0 区域内地表景物,运用 Johnson 识别准则和成像分辨率模型进行分析计算,以及纹理特征提取,得出人工景象区布局图案,如图5所示。按表2模拟材料与模拟物的对应关系,完成模拟材料选型,以及人工景象区设计布设。

表4 光学人工景象区设计结果试验验证体系

隶属阶段	试验名称	试验目的和功能
可行性分析	模拟材料摸底试验	光学成像系统架设一定高度,摸底成像系统在试验场单一背景下对模拟材料的识别能力,验证模拟材料人工景象区的可行性。
	模拟材料监测试验	红外热像仪 24 h 全时段监测模拟材料与试验场背景的亮度对比和表观温差,找出与真实地物背景光学特性差达到等效的时间段。
设计调整	模拟材料选择试验	光学成像系统架设一定高度,基于试验场背景光学特性,选择满足光学特性等效要求的模拟材料,确定模拟材料设计参数。
	实地小规模成像试验	通过飞机挂飞,在试验场小规模铺设模拟材料,验证成像及目标识别结果,为材料设计调整改进及大规模应用提供依据。
	视景建模半实物仿真试验	以模拟材料人工景象区布局图案及试验场真实地形背景为输入,进行计算机成像仿真,给出识别效果,为设计调整提供依据。
结果验证	实景成像试验	通过飞机挂飞,对实景地表景物进行成像,涵盖不同天候和不同时间段。
	场区成像试验	通过飞机挂飞,对人工景象区进行成像,涵盖不同天候和不同时间段。对比实景成像试验的成像对比度层次,验证是否可较完整模拟真实地物与背景的光学特性差。

### 3) 设计试验验证。

人工景象区设计过程中,开展了相关仿真计算和试验。所用的模拟材料样品在模拟试验场单一背景伪装网上的成像结果如图 6,图像边缘清晰,对比度可满足成像系统识别要求;模拟材料在试验场实地监测试验结果如图 7,白天 9 点至 17 点时间段内,材料背景辐射温差在  $-8 \sim 12$  K 变化,在特定时间段,可满足该成像系统识别性能考核中对目标背景光学特性差的阈值指标要求。

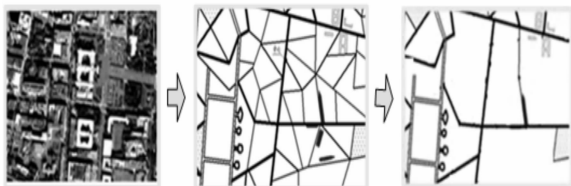


图5 基于 Johnson 准则的人工景象区布局等效性设计及结果示意图

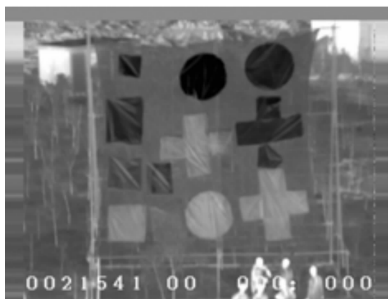


图6 模拟材料选择试验中某时段成像结果

在人工景象区设计过程中开展的视景建模半实物仿真试验表明,通过规模等效,人工景象区规模仅为最大偏差下

范围的 6.2%,通过布局等效,布局区域结构特征强度  $R_a$  为 6.86%,远远低于真实地物背景的 28.96%,极大降低了景象区建设工程量。

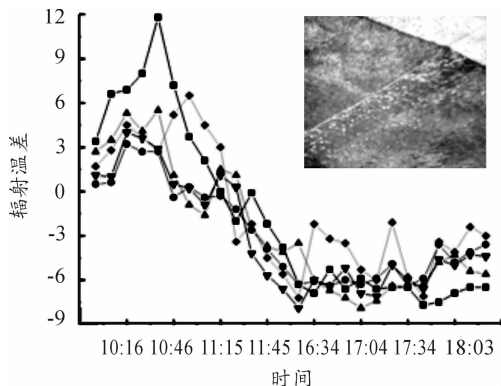


图7 监测试验获取的材料与背景温差变化曲线

对比实景成像试验和人工景象区场区成像试验结果,试验时间涵盖具有明显季节特征的晴天、霾天、阴天等不同天候和不同时间段,实景地物与背景的最高灰度差为 237,最小灰度差为 6,灰度对比覆盖了  $0 \sim 10, 10 \sim 20, 20 \sim 30, 40 \sim 50, 50 \sim 60, 60 \sim 70, 70 \sim 80, 80 \sim 90, 90 \sim 100, 100 \sim 110, 110 \sim 120, 120 \sim 130, 140 \sim 150, 150 \sim 160, 160 \sim 170, 170 \sim 180, 190 \sim 200, 200 \sim 210, 230 \sim 240$  等 19 个层次。而模拟材料与背景的最高灰度差为 139.5,最小灰度差为 4.6,覆盖了  $0 \sim 10, 10 \sim 20, 20 \sim 30, 30 \sim 40, 40 \sim 50, 50 \sim 60, 60 \sim 70, 70 \sim 80, 80 \sim 90, 90 \sim 100, 100 \sim 110, 110 \sim 120, 120 \sim 130, 130 \sim 140$  等 14 个层次。所选光学特性模拟材料覆盖了实景地物与背景对比的 14 个灰度层次(从  $0 \sim 10$  到  $130 \sim 140$ ),且二者的最小灰度差较接近,都在 5 左右。对于光学成像系统,目标背景灰度差大于 100 及 150 以上的属于易识别目标,大于 20

一般为可识别目标,对灰度差小于20的目标识别能力是考核重点。人工景象区较完整地模拟了实景地物的光学特征差。

## 5 结论

1) 通过具体应用实例表明,用光学特性模拟材料构建的人工景象区,实现了对真实地物背景的几何和光学特性等效模拟,满足光学成像系统性能考核要求;同时实现了光学成像系统试验场低成本、利用率高等试验保障目标。

2) 课题研究对模拟材料的发展和和应用,尤其大面积场景光学特性等效方面提供了有效借鉴。

## 参考文献:

- [1] 高波,周斌.用于红外假目标示假的相变材料设计[J].功能材料,2009,40(12):2054-2057.
- [2] 陈翻,张健,王抱式,等.基于涂料性能参数的红外隐身技术[J].光学精密工程,2009,17(2):280-285.
- [3] DAWOOD A S, VISSER S J, WILLIAMS J A. Reconfigurable FPGAs for real time image processing in space[C]//14th International Conference on Digital Signal Processing. [S.l.]:[s.n.],2002:845-848.
- [4] COIRO E. Global Illumination Technique for Aircraft Infrared Signature Calculations[J]. journal of aircraft,2013,50

(1):103-113.

- [5] THOMAS DOWD. Threat and Target Systems[C]//45th Annual Targets, UAVs & Range Operations Symposium. Point Mugu, CA;2007:22-59.
- [6] PRIEST R G. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. Optical Engineering,2002,41(5):169-181.
- [7] 穆原子,丁力军.武器装备试验靶标建设与发展研究[J].国防科技,2013,34(3):40-44.
- [8] 胡传焯.特种功能涂层[R].北京:北京工业大学,2012.
- [9] 张凯,孙嗣良.红外动态场景目标模拟器系统设计[J].红外与激光工程,2011,40(1):12-16.
- [10] 宋江涛,赵英杰.基于加热布的墙体目标红外特征外场模拟系统研究[J].光子学技术,2012,32(1):7-10.
- [11] 宣益民.地面目标与背景的红外特性[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [12] PIETER A. JACOLS.地面目标和背景的热红外特性[M].吴文健,胡碧茹,译.北京:国防工业出版社,2004.
- [13] 张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [14] 周旭.导弹毁伤效能试验与评估[M].北京:国防工业出版社,2014.

(责任编辑 杨继森)

(上接第103页)

## 参考文献:

- [1] 翟亚利,张志华,李大伟.具有漂移特征的退化可靠性评估方法研究[J].系统工程理论与实践,2014(10):2710-2715.
- [2] 翟亚利,张志强,钟强晖.具有参数漂移特征的退化可靠性评估方法[J].海军工程大学学报,2013(2):107-112.
- [3] 张晓燕.飞行间隔标准的安全评估研究[D].天津:中国民航大学,2007.
- [4] 温雯,郝志峰,杨晓伟,等.基于假设检验及异常点剔除的稳健LS-SVM回归[J].模式识别与人工智能,2010

(2):241-249.

- [5] 邵婷婷,张水利,张永波.两种剔除异常数据的方法比较[J].现代电子技术,2008(24):148-150.
- [6] 李丽容,田琛.工程测量中异常数据的剔除[J].石油仪器,1998(5):28-29.
- [7] 苏再兴,王志福,万莹,等.基于正态分布参数无偏估计的几个结果[J].渤海大学学报(自然科学版),2010(3):250-254.
- [8] 陈春华.缺失数据下特殊指数分布参数的无偏估计[D].武汉:华中师范大学,2008.
- [9] 李彦彬,府天洁,刘成绪.一种基于定期检测的导弹可靠度计算方法[J].四川兵工学报,2011(10):1-3.

(责任编辑 唐定国)