

地面目标红外成像仿真系统的设计与实现

余慧娟, 黎 兰, 刘相新, 韦学中

(北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘要: 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, 汇计算目标流场、温度场、红外辐射特性等结果为一体的地面目标红外成像仿真系统; 利用该系统开展了车载发电机组舱红外特性仿真, 并将仿真计算与试验测试结果进行了比对, 结果表明仿真方法合理有效, 地面目标红外成像仿真系统可应用于类似目标、不同工况、多种背景下的地面军事目标红外成像仿真分析。

关键词: 地面目标; 红外成像仿真; 温度场; 车载机组舱

中图分类号: TN216; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2013)01-0031-07

Design and Realization of Ground Objects Infrared Scene Simulator

YU Hui-juan, LI Lan, LIU Xiang-xin, WEI Xue-zhong

(Beijing Institute of Space Launch of Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The Ground Objects Infrared Scene Simulator (GOIRSS) with calculated flow field, temperature field and infrared radiation signature function was designed. It was able to achieve parameter model importing, data and image simulating, results processing and evaluating, imaging displaying and storing. A vehicular generator cabin was used in infrared scene simulation by the Ground Objects Infrared Scene Simulator. The result of experiment and simulation data contrast showed that the simulator has advantages in effective modeling and is suitable for analysis on similar objects, different situation and multi-background.

Key words: ground objects, infrared scene simulation, temperature field, vehicular generator cabin

0 引言

红外成像制导武器具有制导精度高、抗干扰能力强和全天候工作能力, 具有在复杂背景条件下捕获、识别、锁定和跟踪目标的自动决策能力, 对我国导弹发射车、装甲车和坦克等地面军事目标构成了严重威胁, 因此地面军事目标红外伪装隐身技术发展的需求越来越强烈。其中目标红外特性的获取是红外伪装隐身方案设计与效果评估的基础。

获得地面目标红外特性的途径主要有两种, 一种是外场实测、数据库统计, 另一种是理论分析、仿真模拟。因前者存在覆盖工况有限、测试周期长、经费高、受环境影响大、测量不确定性等缺点, 因此开展地面目标红外成像仿真研究, 获得目标不同使用工况、不同背景、不同季节、不同时刻内的红外特性数据和图像显得尤为重要和紧迫。

近 20 多年来国外已经系统地建立了各种目标和背景环境的红外辐射建模理论、仿真模型和校验方法, 并开发形成了一系列较为完整的红外仿真商用和专用软件。其中具有代表性的商用软件有 RadThermIR、MuSES、CAMEO-SIM^[1]、ShipIR/NTCS^[2-3]等; 专用软件有美国密歇根大学研制的坦克红外热像计算软件 PRISM、美国坦克及摩托化司令部考虑大气红外传输影响后研制的 TTIM 软件等。利用这些软件功能集合, 国外能够完成典型目标和场景的红外理论建模、仿真计算和评估工作, 并将研究成果应用于地面军事目标的红外识别、红外成像导引头的仿真和试验中。但迄今为止, 国外公开发表该方面的资料极少, 这些软件所依据的技术路线和详细内容严格保密。

国内也有多家高校和研究机构开发目标红外特征仿真软件。朱涛等建立了海上目标红外隐身效果仿

收稿日期: 2012-10-15.

作者简介: 余慧娟 (1985-), 女, 硕士, 主要从事目标特性研究。

基金项目: 总装备部“十二五”预研项目。

真平台^[4],石磊等编程生成了飞机的红外仿真图像^[5],于洋等进行了基于蒙特卡洛法的红外坦克仿真^[6],陈灵娟等将大气辐射透过率计算软件与当前几种仿真工具进行了集成^[7],林凯等设计了基于 OGRE 的动态红外场景仿真^[8]。综上所述,国内对目标红外仿真研究具有一定得技术积累,包括各类目标和背景的红外特性专用模块的开发和实现,但与工业部门应用需求相比,目前相关软件模块均不同程度存在功能单一、实时性不够、集成性不足、模型和软件的通用性差、模型未经过充分的校验和完善,离形成成熟的软件系统还存在一定差距,不满足工业部门进行地面目标红外成像仿真的要求。

本文通过研究红外成像仿真实理论和设计方法,建立了地面目标红外成像仿真系统(Ground Objects Infrared Scene Simulator, GOIRSS),实现在一个平台界面下仿真模型构建、参数化输入、仿真过程及结果评价等功能的集成。同时以车载发电机组舱(以下简称机组舱)为对象,对 GOIRSS 进行应用说明。这是因为机组舱作为地面野战装备的动力源,通过柴油发电机组发电为装备温控系统和车载设备提供电力,具有功率大、散热量多和封闭空间小等特点,在保证作战装备可靠工作的同时带来了显著红外特征暴露的可能^[9],可认为是典型的需要开展红外伪装隐身设计和效果评估的地面目标。

1 GOIRSS 设计

1.1 GOIRSS 理论基础

GOIRSS 是在目标温度场模型和表面辐射特性基础上,采用经典红外辐射计算方程,如式(1)、(2)和(3)所示,实现对地面目标各探测点下光谱辐射强度、辐射亮度和辐射温度的计算;按照目标与探测点间的大气条件,利用 MODTRAN 软件计算大气透过率,大气吸收后的辐射强度结果是通过把大气吸收前的结果与大气透过率相乘得到的。

①光谱辐射强度是一个描述点源辐射特性的物理量,其定义为辐射源在单位时间内向单位立体角发射的能量,单位为 W/sr。辐射强度计算方程:

$$I_{\lambda, \alpha} = H_{\lambda, \alpha}^R R^2 / \tau_{\lambda, \text{atm}} \quad (1)$$

式中: $H_{\lambda, \alpha}^R$ 为探测点处来自辐射源的照度; R 为探测距离; $\tau_{\lambda, \text{atm}}$ 为探测点和辐射源之间大气的光谱透过率; α 为探测方向对应的角度。

②辐射亮度为单位时间在单位立体角内通过单位面积的辐射能量,单位为 W/(sr·cm²)。辐射亮度计算方程:

$$L_{\lambda, m} = \varepsilon_m L_{b\lambda}(T_m) + (1 - \varepsilon_m) H_{\lambda, m}^0 / \pi \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_m L_{b\lambda}(T_m)$ 为壁面的自身辐射的光谱辐射亮度,其中 ε_m 为壁面的黑度, T_m 为壁面的温度, $L_{b\lambda}(T_m)$ 为壁面温度 T_m 所对应的黑体的光谱辐射亮度; $(1 - \varepsilon_m) H_{\lambda, m}^0 / \pi$ 为壁面对入射辐射的反射形成的光谱辐射亮度,其中 $H_{\lambda, m}^0$ 为壁面的入射光谱辐射照度。

③辐射温度是当目标的辐射出射度与某一温度的黑体辐射出射度相等时,此时黑体的温度即为目标的辐射温度,单位为℃。辐射温度计算方程:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot \frac{E(T)}{\pi} \Gamma(\lambda_1 T, \lambda_2 T) \quad (3)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为计算的波长范围; L_{λ} 为辐射亮度值; τ_{λ} 为透过率; ε 为发射率; $\Gamma(\lambda_1 T, \lambda_2 T)$ 为在 λ_1 和 λ_2 波段内的平均黑体辐射力; $E(T)$ 辐射照度。

1.2 GOIRSS 模块及主要功能

GOIRSS 主要由五大模块构成:建模及网格划分及整理模块、流场和温度场仿真模块、材料数据库应用模块、红外辐射仿真模块以及模块化集成封装界面模块等,如表1所示。同时,为了更有效分析和处理所获得的数据,GOIRSS 所构建的接口和管理系统具有可扩展性,可根据需要随时增加新的处理功能模块。

1.3 GOIRSS 工作界面开发

采用基于知识和工作流程的仿真过程封装和集成方式,将仿真模型、参数化设计输入及仿真过程按照模块化思想封装到软件系统中,如图1所示,通过交互操作,在系统内实现模型参数的修改和编辑、模型的导入导出、计算程序的后台调用、仿真结果的定制与处理、成像效果输出等功能。设计人员可在一个界面内完成发射平台的流场、温度场、红外辐射特性仿真计算,大大提高了软件操作的通用性和便捷性。

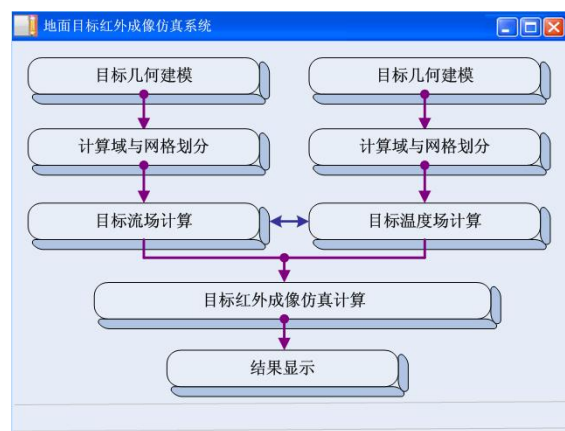


图1 目标红外成像仿真系统的界面

Fig.1 The interface of GOIRSS

1.4 GOIRSS 仿真总体流程

GOIRSS 红外仿真流程按图2所示可描述为:首

表1 红外成像仿真系统组成模块及功能

Table1 The composed of modules and functions of GOIRSS

系统模块	功能模块	实现途径
流场、温度场、红外特性网格划分及整理模块	几何建模和网格划分模块	调用商用软件 UG、Gambit 或 ICEM，完成目标几何建模和网格划分的功能。
	红外计算网格整理模块	通过对网格区域温度、黑度赋值设置，完成计算域小、网格疏、质量高的网格文件构建和整理。
		通过对网格区域双面辐射、矢量方向设置，完成计算域小、网格疏、质量高的网格文件构建和整理。
流场和温度场仿真模块	流场计算结果数据转换模块	调用商用软件 Fluent 给出流体流动细节的描述，如速度场、压力场、密度分布特点，完成目标内外流场计算。计算结果被红外辐射强度计算模块调用。
	温度场计算结果数据转换模块	调用商用软件 Radtherm 模拟复合材料、多层材料、气动生热等特殊热问题，同时考虑自然环境和天气状况等综合因素，完成目标各工况下温度场计算。计算结果被红外辐射强度计算模块调用。
	流场和温度场迭代耦合计算模块	在 Fluent 中设置壁面温度为定值，计算换热系数和流体温度，将结果导入到 Radtherm 参与壁面温度计算，结果输出至 Fluent 重新计算换热系数和流体温度，如此反复迭代，直至收敛。
材料数据库应用模块		构建目标材料热物性参数（厚度、密度、导热系数、发射率等）应用数据库，通过该模块能够实现在软件中直接调用材料名称即可完成材料参数赋值。
红外辐射仿真模块	红外辐射强度计算模块	依据红外辐射特征仿真的相关理论和方法，采用经典红外辐射计算方程，利用自主开发软件完成计算。
	红外辐射大气衰减计算模块	按照目标与探测点间的大气条件，计算大气衰减。再通过量化等手段，将辐射数据转换为亮度来显示。
模块化集成封装界面		通过设置操作路径提示、按钮功能提示、操作错误提示、工作状态显示、自动调用其它软件、自动识别某些参数、结构显示、界面换肤等操作功能按钮，实现对整个计算过程软件的调用和统一管理。

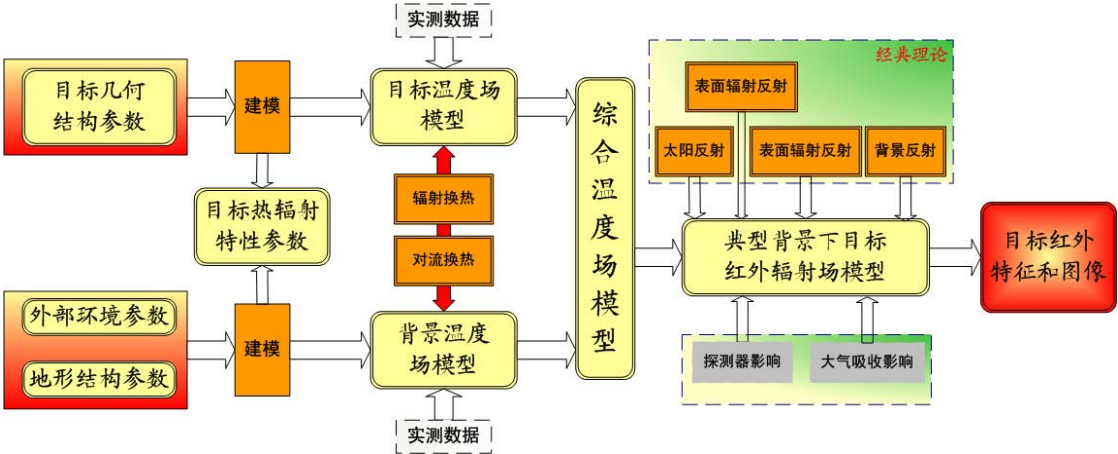


图2 目标红外成像仿真系统的仿真流程

Fig.2 The simulation process of GOIRSS

先通过几何建模和网格划分模块获得目标参数化模型，并通过应用数据模块设定模型的各边界条件；然后调用商用软件对目标内、外流场分布进行仿真计算，获得其对流换热系数和流体温度；接着根据传热学原理建立目标热模型，耦合流场效应和自然环境的

作用，计算目标表面的温度场分布，完成目标热特性模拟；在目标温度场模型基础上，依据红外辐射理论方法和仿真模块，实现典型背景下地面目标在不同工况、不同天气、不同时刻（一个自然天）内的红外成像仿真。

2 GOIRSS 实现

2.1 机组舱仿真模型建立

机组舱主要组成部件有：舱体、柴油机、发电机、空滤器、消声器、混合腔、电缆箱、控制箱，以及通道等，热特性分布受结构布置形式、负载变化情况等因素影响，且与机组舱材料特性、红外辐射遮挡、太阳辐射及外部环境等相关，会直接影响仿真结果。结合机组舱重点热源工作特性，建立了机组舱红外辐射模型，主要包括：柴油机风扇入口和燃气出口模型，发电机主体、底座和通道模型，空滤器和消音器通道模型，排烟管道模型，舱体多个进出口栅格模型、机组舱舱体模型以及舱外界环境域模型等。

机组舱模型网格划分过程中遵循了以下原则：①在模型外形复杂的位置和尺寸相对较小的位置进行网格加密；②外界环境流体域靠近机组舱舱体的网格较密，越远离壳体网格越稀疏；③机组舱混合腔的表面网格构建较密；④壳体上百叶窗周围的网格划分较密。机组舱流场计算模型采用非结构化网格，总体网格量在 360 万左右，如图 3 所示；机组舱温度和红外计算模型采用同一套网格，均为三角形面网格，网格相对流场计算的网格较稀疏，总网格量大约在 2.3 万左右。

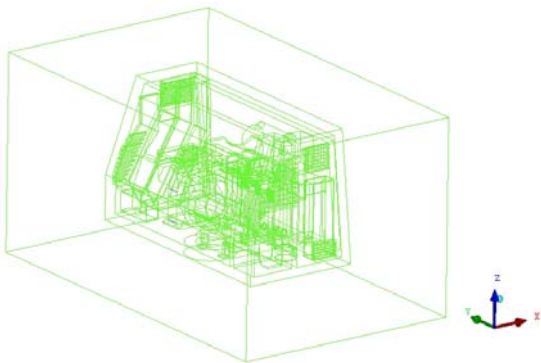


图 3 机组舱及外界环境域计算模型

Fig.3 The simulation model of the vehicular generator cabin and external environment domain

2.2 计算边界条件设置

为便于进行仿真和试验结果的比对，以 2010 年 9 月 29 日在北京某室外实验场完成的机组舱红外试验工况为计算模型边界条件，如表 2 所示。模型流体域中的流体选择空气，对于柴油机的进出口、以及发电机的进出口均设置为速度出口。其它速度边界条件的设置采取总流量相等的原则，进行计算求得。同时设置了机组舱的材料密度、比热容、导热系数以及表面发射率。

2.3 计算机组舱流场分布

机组舱流场可分为外部流场和内部流场两类。外

部流场除与机组舱表面形状相关以外，还与机组舱在外界环境中的温度、风速、风向等有关；内部流场是指环境气流通过机组舱外壳上的百叶窗和其它进风口进入柴油机、发电机以及整个舱体内，经过燃烧、冷却等复杂过程，最终从混合腔流出等复杂过程。当机组舱不工作时，内部气流基本不流动，采用环境自然对流方式模拟外流场。当机组舱工作时，发电机和柴油机等热效应引起机组舱内部气体流动换热，吸入的气体带入热量，排出的气体带走热量，需要同时模拟内部和外部流场。

表 2 机组舱背景环境边界条件设置

Table2 The setting of the vehicular generator cabin background environment boundary conditions

时 刻	空气温度 /℃	风速 /(m/s)	湿度 /(%)	风向
01:00AM	8.0	1.0	81	西北
04:00AM	7.0	0	87	西北
08:00AM	11.7	2.0	59	东北
12:00PM	18.0	2.0	45	正南
16:00PM	21.0	4.0	33	西南
20:00PM	14.0	1.0	67	西北

注：设置经度为-116.6°、纬度为 40.1°、时区为东八、海拔高度为 50m。

利用 Fluent 软件计算机组舱流场分布，设置柴油机的体热源、栅格结构多孔跳跃、压力入口和出口、风扇入口和出口、材料参数等边界条件，计算结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出气流从环境流经舱体百叶窗进入柴油机、发电机以及整个舱体内，最终从混合腔流出。由于整个舱内空间狭小、流体之间的相互碰撞，形成了大大小小的涡，且从混合腔出来的气流会再次通过百叶窗进入壳舱。图 4(b)显示了柴油机进口、舱体进口和发电机进出口等速度分布情况，可以看出发电机进出口流速较高，且在发电机进口的一处拐角处，出现了高速区。图 4(c)是机组舱内壁面气流温度云图，结果显示壳体内表面靠近柴油机表面以及靠近混合腔表面处温度都很高。

2.4 计算机组舱温度分布

计算地面目标温度场分布时，需要考虑周围环境和太阳辐射对目标表面换热的影响。采用 Fluent 计算获得的对流换热系数和流体温度，建立机组舱的传热模型。计算时考虑了不同经纬度、不同海拔高度条件下太阳直射、云层散射、地表反射等完整的太阳辐射传热过程；同时将自然天气（温度、湿度、风速、风向等）边界条件输入至机组舱传热模型中，实现典型

背景下机组舱在不同工况、不同天气、不同时刻(1个自然天)内的温度场分布仿真,结果如图5所示。由仿真结果可知:

- 1) 随着夜晚到白天太阳照射不断增强,气温升高,对机组舱的加热效果明显,使得各位置温度也迅速升高;
- 2) 白天高温环境下,进入机组舱的空气温度高,从而引起机组舱带载工作负荷加大,舱内气流流动加剧,引起整个机组舱温度上升明显,也包括机组舱出风口温度增大,造成辐射到地面的热量增加,这也就解释了不同时刻地面的温度分布不同。同时不同时刻地面温度的差异还体现在一天中不同时刻太阳对地面的照射强度的变化;
- 3) 由于机组舱离地有一定高度,因此机组舱底部出风口排放的高温气体使得附近地面温度升高,而被加热地面、热空气对舱体前门、底座的二次加热导致这些位置温度升高。

2.5 机组舱红外辐射分布仿真

依据红外辐射理论模型和前述温度场计算结果,对机组舱进行了红外成像仿真。以模型顶面中心作为探测面,如图6所示对机组舱从左侧至右侧180°范围内进行计算,获得机组舱不同探测角度下的光谱辐射强度和辐射亮度。

1) 不同探测角度下红外光谱辐射强度

不同角度、不同波段、大气吸收前后的机组舱红外光谱辐射强度计算结果如图7所示,结果表明:中波波段($3\sim 5\mu\text{m}$)上,随着波长的增大,光谱辐射强度增加,辐射强度最大接近 $10\text{ W}/(\text{sr}\cdot\mu\text{m})$;而长波波段($8\sim 14\mu\text{m}$)上,光谱辐射强度随着波长的增大先增大后减小,波长 $\lambda=9.5\mu\text{m}$ 附近最大,最大值接近 $35\text{ W}/(\text{sr}\cdot\mu\text{m})$ 。

对比大气吸收前后的光谱辐射强度,结果表明:在 $4.2\sim 4.4\mu\text{m}$ 、 $13.8\sim 13.9\mu\text{m}$ 等波段吸收较强,部分甚至完全吸收。大气吸收在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段比较强烈,在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段相对较弱。

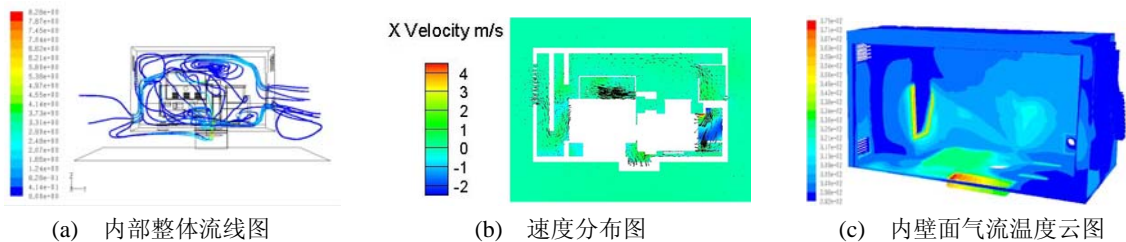


图4 机组舱内部流场分布

Fig.4 The internal flow field distribution of the vehicular generator cabin

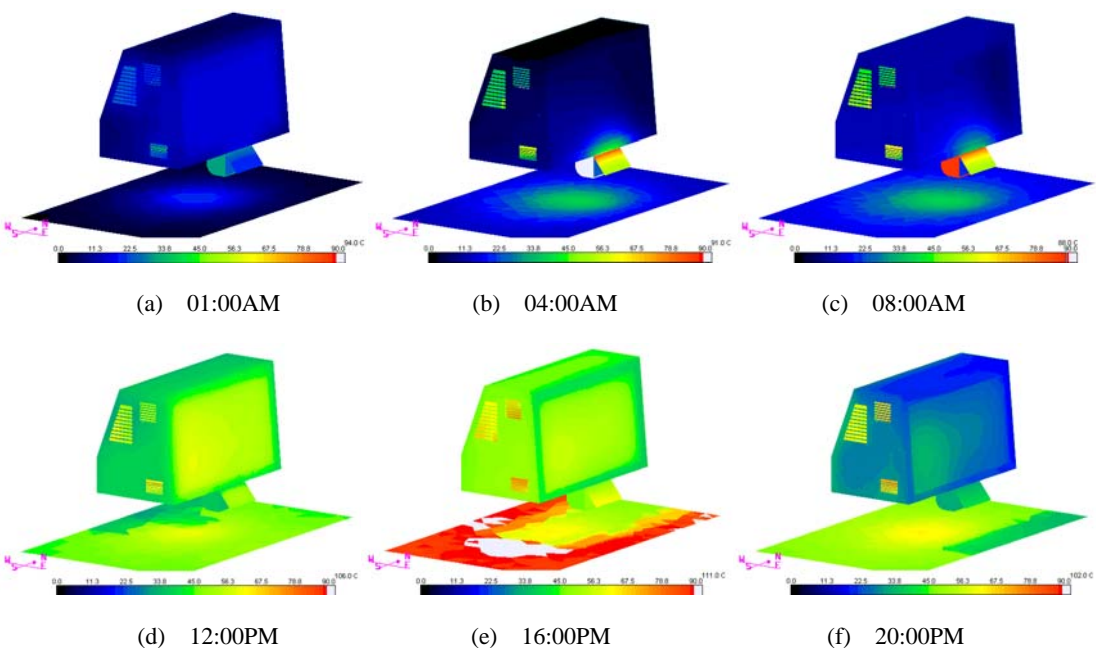


图5 一个自然天内机组舱不同时刻仿真温度分布云图

Fig.5 The temperature images simulation of the vehicular generator cabin at a naturally different time

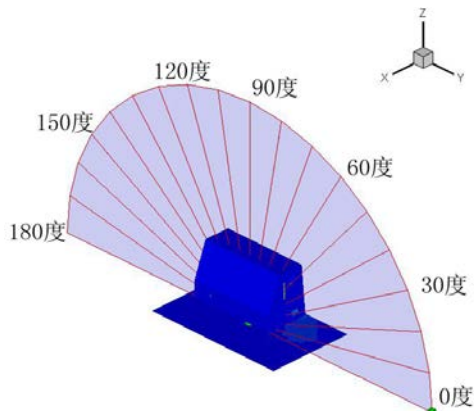
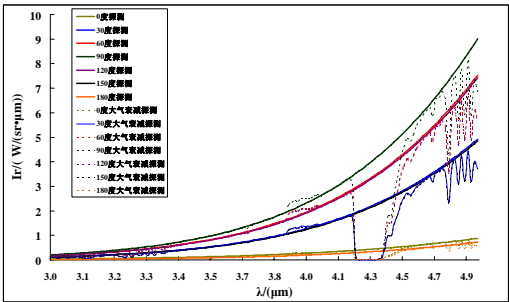


图 6 机组舱红外辐射计算探测面

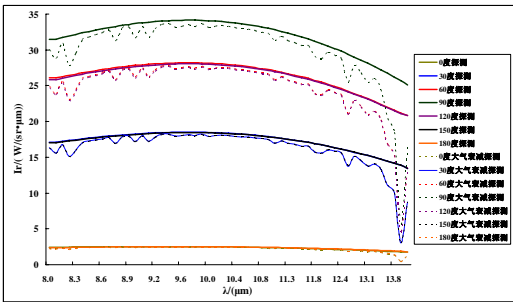
Fig.6 The detection surface of the infrared radiation simulation

2) 不同探测角度下红外辐射亮度

不同角度、不同波段上的机组舱红外辐射亮度计算结果如图 8 所示，结果表明：辐射亮度值长波波段（8~14μm）高出中波波段（3~5μm）一个数量级，并且从不同探测角度可以看出机组舱主要的高辐射亮度部件有壳舱内的高温部件、混合腔，以及地面。



(a) 3~5 μm



(b) 8~14 μm

图 7 机组舱在不同探测角度下的光谱辐射强度图

Fig.7 The spectral radiance images of the vehicular generator cabin at different detection angle

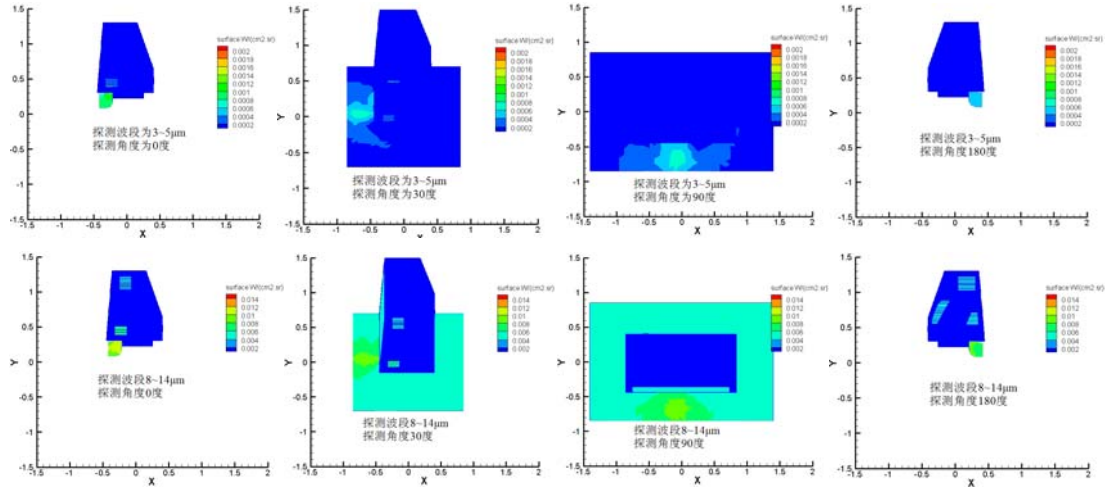


图 8 机组舱在不同探测角度下的红外辐射亮度图

Fig.8 The infrared radiance brightness images of the vehicular generator cabin at different detection angles

2.6 试验验证结果

将机组舱仿真计算和试验测试得到的辐射温度对比分析，如图 9 所示。从图示可以看出，仿真与试验测试结果趋势一致，较好地模拟了机组舱典型工况和自然环境双重作用下红外特性分布；机组舱典型部位的仿真与测试结果偏差绝对值在 3.7℃，偏差最大值 8.2℃。分析误差原因主要包括太阳辐射模型精度、机组舱气流对流换热模拟精度、多层结构模型精度和材料热物性参数模拟精度等几个方面。

3 结束语

通过研究红外成像仿真实理论和设计方法，构建了首个系统化、集成化、适用化、界面友好化的 GOIRSS，实现在一个平台下仿真模型、参数化输入、仿真过程及结果评价的功能集成。以机组舱为对象开展了红外成像仿真，获得了机组舱流场和温度场数据，以及红外光谱辐射强度和亮度，该仿真方法得到了试验验证，GOIRSS 可应用于类似系统、不同工况、多种背景下的地面目标红外成像仿真，极大程度上提高了红外伪装设计和伪装隐身效果评估的指导作用。

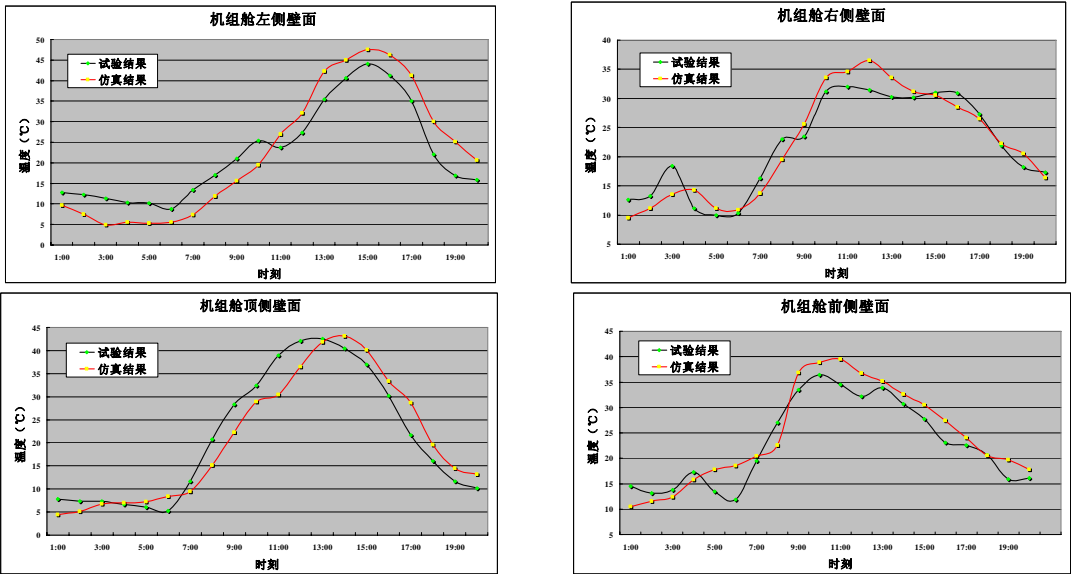


图9 机组舱辐射温度测试与仿真计算的结果对比

Fig.9 The results contrast of the radiation temperature by testing and simulation of the vehicular generator cabin

参考文献：

[1] Nelsson C, Hermansson P, Nyberg S, et al. Optical signature modeling at FOI[C]//*Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications III. English: Proc of SPIE*, 2006, **6395**, 639508-1-12.

[2] DAVID A VAITEKUNAS. Validation of Ship IR (v3.2): methodology and results[C]// *Proc of SPIE, Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation*, 2006, **6239**, 62390K-1-12.

[3] 范晋祥, 岳艳军. 目标与场景的红外特性建模与仿真软件的发展[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(增刊): 389-396.

[4] 朱涛, 徐晓刚, 王孝通. 红外隐身涂料涂敷效果仿真[J]. *系统仿真学报*, 2010, **22**(5): 1279-1281.

[5] 石磊, 华祖耀, 饶颖. 飞机红外辐射图像仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2007, **24**(10): 184-186.

[6] 于洋, 汤心溢, 高思莉. 基于蒙特卡洛法的红外坦克仿真[J]. *半导体光电*, 2010, **31**(2): 325-327.

[7] 陈灵娟, 李岩, 张明慧, 等. 红外目标的数字建模[J]. *计算机仿真*, 2010, **27**(4): 215-218.

[8] 林凯, 黄曦. 基于 OGRE 的动态红外场景仿真研究[J]. *电子科技*, 2010, **23**(4): 7-9.

[9] 龚为佳, 沈卫东. 隐身技术在军用移动电站排放中的应用[J]. *移动电源与车辆*, 2009(4): 24-28.