

## 目标与背景的红外辐射特性仿真方法

成志铎, 李明博, 李 健, 常晓权, 刘 君

(北京特种机械研究所, 北京 100143)

**摘 要:** 基于红外辐射理论, 综合考虑自身辐射、反射辐射、大气长波辐射等因素, 研究了目标的红外辐射特性仿真方法, 编制了目标红外辐射仿真软件。以某钢板为例, 建立了目标的仿真计算模型, 确定了目标表面的边界条件, 计算了目标表面的温度场分布, 将仿真计算与试验测量的钢板表面温度数据进行了对比, 结果显示: 仿真计算的平均误差在 1.5 °C 以下, 验证了仿真方法的正确性, 并在此基础上仿真计算了不同时刻目标的红外辐射特征分布, 证明了红外仿真方法的合理性, 为车辆与复杂背景的红外仿真计算奠定了基础。

**关键词:** 目标; 背景; 试验; 仿真; 红外辐射

**中图分类号:** TN219    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2336-05

## Simulation method for characteristics of infrared radiation of target and background

Cheng Zhiduo, Li Mingbo, Li Jian, Chang Xiaoquan, Liu Jun

(Beijing Institute of Specialized Machinery, Beijing 100143, China)

**Abstract:** Based on the infrared radiation theory, some factors such as self-radiation, reflection radiation and long wave radiation of the atmosphere were considered. The simulation method of infrared radiation characteristics of the target and the infrared radiation simulation software of object were studied. With a steel plate as an example, the simulation of the target was modeled, and the surface boundary conditions of object was determined. Through the surface temperature field of the target calculated, the temperature data of the steel plate calculated by simulation was compared with the data measured by test. The results show that the average error of simulating calculation is less than 1.5 °C, it verifies the correctness of the simulation method. Based on the simulation software, the distribution of infrared radiation characteristics of the target in different time is calculated. The rationality of infrared simulation method is proved, and it lays the foundation of infrared simulation of vehicle and complex background.

**Key words:** target; background; test; simulation; IR radiation

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-03

基金项目: 航天支撑技术基金(61801020402)

作者简介: 成志铎(1987-), 男, 助理工程师, 主要从事目标红外辐射特性仿真及其抑制技术方面的研究。Email: chengzhiduo@163.com

## 0 引言

在海湾战争(1990年)、科索沃战争(1999年)、美伊战争(2003年)以及利比亚战争(2011年)中,红外精确制导武器在战场上都显示出了巨大的威力,从战场的结果来看,不具备红外隐身性能的武器车辆在战争中生存能力大大降低<sup>[1]</sup>。因此,对武器装备的红外辐射特性进行研究,隐藏、改变或者控制其红外辐射特性可实现战场上的单项透明,避免敌方的技术侦察、打击,能够有效提高武器装备的生存能力和战斗能力<sup>[2-4]</sup>。

随着计算机技术的迅猛发展和各个学科基础性的深入研究,数字仿真和目标建模以其全面、可重复性、低成本、可视化等优点,在武器装备领域中获得了广泛的应用,利用计算机仿真生成目标与背景红外图像的技术已经用于目标识别与跟踪等方面<sup>[4]</sup>。研究准确高效仿真方法和计算模型,可对车辆目标与复杂背景的红外辐射特性进行仿真预估,对研究新型武器车辆平台隐身设计、新型红外涂料隐身性能、新型红外传感器评估技术等都具有重要意义。国内外很多学者和单位都对红外仿真方法有着深入的研究,国外尤其是美国和俄罗斯对车辆的红外辐射特征进行了大量研究,开发出了很多商业软件,如:MuSES、RadthermIR、CAMEO-SIM、Irma等<sup>[5-9]</sup>,基本满足了用户要求。国内很多高校和相应的研究机构也建立了各自的仿真模型,计算了相关目标的红外辐射特征,并试验测量了目标的红外热图像,对比分析了仿真计算与试验测量的误差,但仿真模型较为简单,仿真体系不够系统完整,仿真目标在自然环境中的红外特性精度还不够<sup>[10]</sup>。文中以某钢板模拟发射车、军用运输车等结构部件的外表面为例,在外场环境中进行试验测试,并与仿真结果进行对比,验证红外仿真方法的正确性,最后通过编制的红外仿真软件对不同时间目标与地面的红外热像进行仿真计算,为后续进行车辆与复杂背景的红外仿真计算奠定了重要基础。

## 1 红外辐射基础理论

### 1.1 自身辐射

在求得目标表面温度场分布后,该部分红外辐射能量可以从普朗克公式出发,通过对红外波段范围积分得到,计算公式如下:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (1)$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 为红外波段范围的上、下限; $T$ 为该单元表面温度; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为表面发射率,与波长 $\lambda$ 和温度 $T$ 有关; $C_1$ 为第一辐射常数,等于 $3.74 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ ; $C_2$ 为第二辐射常数,等于 $1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

### 1.2 反射辐射

反射辐射<sup>[10]</sup>部分主要包括单元表面对太阳、天地背景以及其他单元表面辐射的反射,具体计算表达式如下:

$$E_{sf}^{infra} = \rho_{sun}^{infra} \cdot q_{sun}^{infra} + \rho^{infra} \cdot \left( q_{sky}^{infra} + q_{grd}^{infra} + \sum_{j=1}^N q_j^{infra} \right) \quad (2)$$

式中: $\rho^{infra}$ 为单元表面红外波段范围的反射率; $\rho_{sun}^{infra}$ 为单元表面红外波段范围的太阳反射率; $q_{sun}^{infra}$ 为单元表面接收的红外波段范围内的太阳辐射能量; $q_{sky}^{infra}$ 为单元表面接收的红外波段范围内的天空背景辐射能量; $q_{grd}^{infra}$ 为单元表面接收的红外波段范围内的地面背景辐射能量; $q_j^{infra}$ 为单元表面接收的红外波段范围内的 $j$ 单元表面辐射能量; $N$ 为单元表面总数。

目标表面任一单元总的辐射通量为自身辐射与反射辐射之和,即

$$E = E_{\lambda_1-\lambda_2} + E_{sf}^{infra} \quad (3)$$

### 1.3 大气长波辐射

阳光透过大气层到达地面的途中,约有10%被大气中的水蒸汽和二氧化碳所吸收,大气还吸收来自地面的自身辐射和反射辐射,具有了一定的温度,从而产生长波辐射,其辐射强度一般由气象条件如云层、大气温度等决定<sup>[10]</sup>。天空无云时,大气长波辐射为:

$$q_{skyr}^{infra} = \varepsilon \sigma T_a^4 (a + b \sqrt{e_a'}) \quad (4)$$

式中: $\varepsilon$ 为大气发射率; $a$ 、 $b$ 为经验常数, $a=0.61$ , $b=0.05$ ; $\sigma$ 为Stefan-Boltzmann常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ; $e_a'$ 为近地面层水汽压,KPa,是气温 $T_a$ 和相对湿度RH的函数。

$$e_a' = RH \cdot 0.61078 \cdot \exp\left(17.269 \cdot \frac{T_a - 273.15}{T_a - 35.19}\right) \quad (5)$$

在有云覆盖时,应考虑云的长波红外辐射的影响,此时需要对上述计算结果进行修正:

$$q_{skyr}^{infra'} = (1 + c \times cc^2) \times q_{skyr}^{infra} \quad (6)$$

式中: $c$ 为与云类型有关的系数; $cc$ 为云覆盖率。

## 2 目标红外辐射特性仿真计算

### 2.1 仿真总体流程

根据不同目标的几何结构和工作原理以及是否有内热源等特点,考虑目标与周围背景环境的能量交换关系,如导热、对流换热、辐射、大气长波辐射、遮挡等,建立描述目标与背景温度分布的数学模型,求解目标与背景环境的温度场,并根据目标与背景表面材料的红外辐射特征参数,计算当前背景下目标在不同工况、不同天气、不同时刻下的红外辐射特性仿真。

### 2.2 模型建立及网格划分

为了模拟钢板表面的温度分布,建立仿真模型时考虑了地面对钢板的热及红外特征的影响,但实际水泥地面结构模型复杂,建模时对地面进行了一些合理的简化,文中做了以下假设:地面表面是平整的,水泥地面的各项参数均匀,且各向同性。模型的网格划分,如图 1 所示,两者均采用结构性网格,网格质量良好。按照实际试验要求钢板朝向正南方向,与地面夹角  $60^\circ$ 。

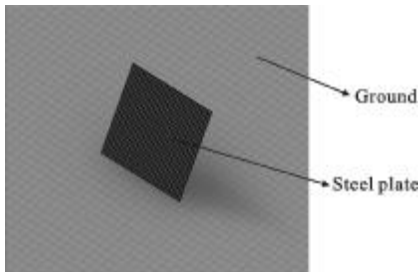


图 1 计算模型

Fig.1 Computational model

### 2.3 热边界条件

通过编写相关函数来计算此综合热流边界条件,其中包括钢板表面与空气的对流换热、钢板表面与地面和天空背景的辐射换热等。对于目标表面,热边界条件的表达式为:

$$A_t \cdot k_t \cdot \frac{T_t - T_p}{\delta} = A_t \cdot h_t \cdot (T_\infty - T_t) + \sum_{j=1}^{N+2} A_t \cdot F_{tj} \cdot \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot (T_j^4 - T_t^4) + A_t' \cdot q_{sd} \cdot \alpha_s + A_t \cdot (q_{sr} + q_{sf}) \cdot \alpha_s \quad (12)$$

式中: $k_t$ 为导热系数; $h_t$ 为表面对流换热系数; $\varepsilon_t$ 为表面发射率; $\sigma$ 为玻耳兹曼常数; $F_{tj}$ 为表面对j单元外表面(其中含天空背景和地面)的辐射传递系数; $q_{sd}$ 为太阳直射辐射功率密度; $q_{sr}$ 为太阳散射辐射功率

密度; $q_{sf}$ 为环境反射的太阳辐射功率密度; $\alpha_s$ 为表面的太阳辐射吸收率; $A_t'$ 为表面的太阳入射投影面积; $A_t$ 为表面的实际换热面积; $N+2$ 为与该表面存在辐射换热的单元表面、天空背景和地面的总和。

其中对流换热项采用经验公式近似计算对流换热系数,由参考文献[10]可知:

$$h_t = 0.7331|T_s - T_\infty| + 1.9v + 1.8 \quad (13)$$

式中: $T_s$ 为待求表面的温度; $T_\infty$ 为空气的温度; $v$ 为风速。

白天,当目标处于外界环境中,太阳辐射对钢板的热辐射将导致其温度发射变化,利用参考文献[10]中的太阳辐射求解公式计算每个时刻太阳的辐射热量,在太阳求解公式中给定大气透明度、方位、经纬度、时区和具体时间(月、日、时、分)以及天气状况(大气透明度)等方可计算得到此地此时的太阳辐射大小。

边界条件中所需时间、地理、气象等参数,均按照试验测试数据进行设置。

### 2.4 钢板的红外特性仿真计算结果与分析

根据红外辐射理论,综合考虑自身辐射、反射辐射、大气长波辐射等因素,研究了目标的红外辐射特性仿真方法,编制了目标红外辐射仿真软件,利用此仿真软件计算得到了钢板不同时刻的红外辐射图像,具体如图 2 所示。

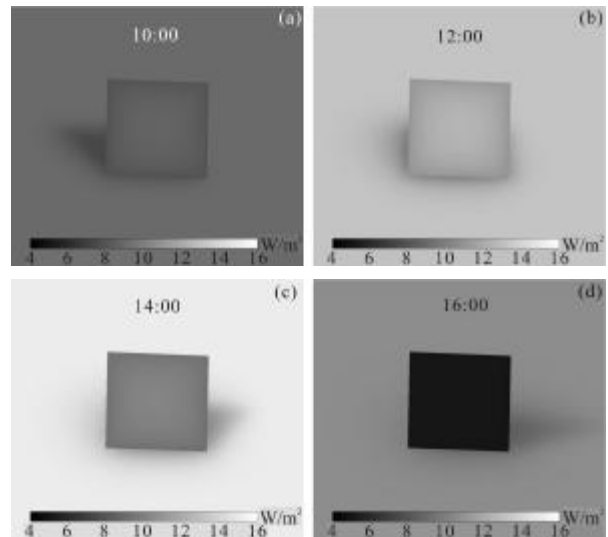


图 2 不同时刻钢板 3-5 m 的红外特征图像

Fig.2 3-5 m infrared radiation images of steel plate at different time

由于钢板的热容比地面水泥的热容要小,导致钢板比地面的温度上升快,下降也快,红外辐射也呈现出上升快、下降快的特点。由于太阳辐射的原因,

图中钢板在地面上形成了明显的红外阴影,并随着太阳方向的移动而变化,符合其红外辐射的变化规律。同时由图 2(b)看出钢板中间位置的红外辐射最强,而钢板表面的特征参数一致,说明了钢板中间温度较高,这是因为钢板边缘位置的对流换热较大,中间位置的对流换热较少所致,与下面的测试结果吻合,验证了仿真方法的正确性。

### 3 试验验证

文中以一块 45 cm×44 cm×0.3 cm (长×宽×高)的钢板为例,测试目标温度及红外辐射特性分布。试验分别进行硬件设计和软件设计,搭建了一套温度采集装置,编制了一套用于采集钢板温度变化的软件,试验中钢板朝向正南方向,与地面夹角 60°。

#### 3.1 试验测量设备

##### 3.1.1 温度测量设备

测试钢板温度分布的主要设备如下:(1) 热电偶:制作精度为 0.1℃的 K 型热电偶,并对其进行校验标定;(2) 温度采集装置;(3) 温度采集软件;(4) 其他设备:AVM-05/07 风速仪、TES-1336A 数字式辐照计、TES-1360A 数字式湿度计,插线板,计算机等。

##### 3.1.2 热电偶测温设计

为了准确地研究钢板红外辐射特性,需在钢板上按照设计尺寸合理排列热电偶,现根据试验需要,在钢板上中心点安装一个热电偶,以此点作为基点 S0,并以此点为中心画边长为 16 cm 的正方形,在其周围均匀安装 4 个热电偶(即四角),分别设为 S1、S2、S3、S4。再以 S 为中心点画边长为 32 cm 的正方形,在其周围均匀安装 8 个热电偶(即四角和四条边的中间点),分别设为 S5、S6、S7、S8、S9、S10、S11、S12。至此钢板共布置了 13 个热电偶,记录各位置对应的热电偶编号,连接采集模块后,记录各位置对应的通道号。热电偶排列方式具体如图 3 所示。

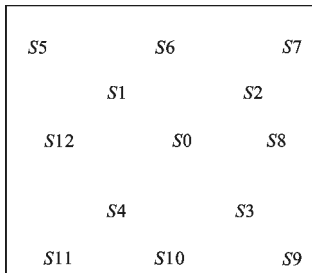


图 3 热电偶排列设计模型

Fig.3 Thermocouple arrangement design model

#### 3.2 试验测量内容

由于钢板表面红外辐射特性的变化规律由温度变化规律以及辐射特性参数确定,所以在对钢板的热特征进行外场试验测试时,选择测试参数包括:太阳辐照度、大气温度、湿度、风速以及钢板的表面温度等。此次实验主要是测试 5 月 30 日 9:00~19:00 之间钢板表面的温度分布,试验中设置每秒采集一次温度数据。

#### 3.3 试验气象测量结果分析

试验测试地点地理位置如下:东经 119.5°,北纬 32.5°。图 4 是 5 月 30 日 9:00~19:00 时间段的风速、空气湿度、空气温度和照度的变化趋势。

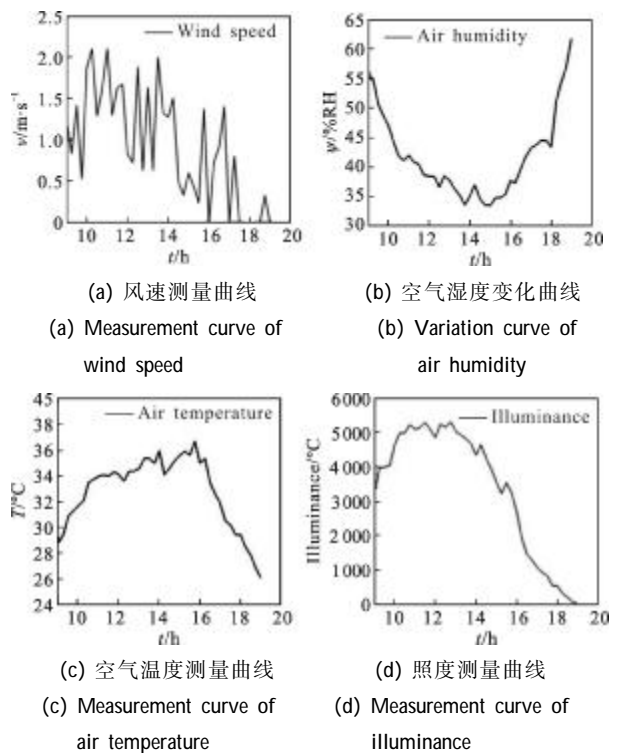


图 4 气象测试数据

Fig.4 Tested data of weather

由图 4(a)可知:测温当天风速范围为 0~2.5 m/s,风速会对钢板表面温度影响较大;由图 4(b)可知测温当天湿度较大,随着时间的推移,湿度先减小后增大;由图 4(c)可知:当天大气温度在 34℃左右,随着时间的推移,温度先增大后减小,与大气湿度形成了鲜明对比;由图 4(d)可知,试验时天气为多云天气,大气透明度低,太阳辐射照度不大,且照度不稳定,尤其是中午。

### 4 试验测试与仿真温度结果对比分析

在钢板上代表性的选择了三个点,验证仿真计

算方法的正确性。图 5(a)为试验中三个不同测点的温度变化过程,可以看出:中心 S0 点由于对流换热较少,温度最高,S7 由于位置较高,对流换热较大,因此温度最低,验证了仿真结果中温度分布梯度的正确性。从图 5(b)、(c)、(d)中可以看出:测点计算值与试验值基本吻合,虽然存在一定的误差,但温度的平均绝对误差基本都在 1.5℃之内,满足仿真计算在工程上的要求。产生误差的原因有很多,如钢板材料的物性参数、表面涂层发射率和太阳吸收率等,而对钢板背面对流换热系数的确定存在误差是导致仿真产生误差的主要原因,同时试验中也存在热电偶及其他测试仪表引起的误差。

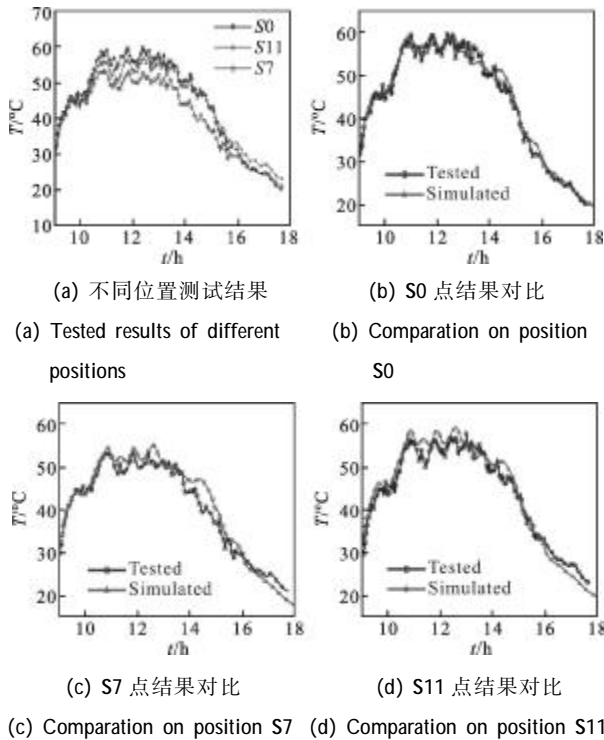


图 5 不同位置的仿真与试验温度数据

Fig.5 Comparison simulated data with tested data in different positions

## 6 结论

基于红外辐射理论,综合考虑自身辐射、反射辐射、大气长波辐射等因素,研究了目标的红外辐射特性仿真方法,编制了目标红外辐射仿真软件。以某钢板在地面背景中的外场试验为例,通过对钢板的外场测量试验的设计,制作了温度采集模块,编制了温度采集软件,搭建了试验测试平台,试验测量得到了当天的风速、空气温度、空气湿度、以及辐照度等气象数据,同时采集了钢板表面 13 个不同位置的温

分布。将测试的气象条件作为输入数据,对钢板进行了温度场的仿真计算。

(1) 钢板与地面的热容差异带来两者温度变化速率的不同,仿真结果与理论吻合。

(2) 仿真结果与试验测试结果都显示出了相同的钢板温度梯度规律,即钢板中心温度最高,周围逐渐降低,验证了仿真方法的合理性。

(3) 仿真计算与试验测量的温度数据对比结果显示:平均绝对误差基本都在 1.5℃之内,验证了目标与背景红外辐射特征仿真计算方法的正确性,为后续利用此仿真方法计算车辆目标与复杂背景环境的红外辐射特性奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Wang Zhangye, Wu Zhihua, Bao Hujun, et al. Realistic image synthesis of infrared target with background [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(11): 1001-1004. (in Chinese)
- [2] Min Jun, Deng Xiao. Infrared characterizations about targets and backgrounds[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 385-388. (in Chinese)
- [3] Jiang Yiming, Wang Keyong, Zheng Lian, et al. Infrared imaging modeling and simulation of a tank target [J]. Infrared Technology, 2008, 30(1): 39-42. (in Chinese)
- [4] Han Yuge, Xuan Yiming, Ma Zhongjun. Assessment on the infrared stealth effect of imaging object [J]. Infrared Technology, 2010, 32(4): 239-241. (in Chinese)
- [5] Wellesley Pereira. Hyperspectral extensions in the MuSES signature code[C]//SPIE, 2008, 6965: 69650B-1-8.
- [6] Keith Johnson, Allen Curran. MuSES: a new heat and signature management design tool for virtual prototyping [C]//GTMV 98 Conference, 1998.
- [7] Kirk M Cowan. CAMEO-SIM: an ocean model extension to the physically accurate broadband EO scene generation system for the assessment of target vehicles within their natural environments[C]//SPIE, 2004, 5431: 288-29.
- [8] Fan Jinxiang, Yue Yanjun. Development of software for modeling and simulation of target and scene's infrared signature [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 389-396. (in Chinese)
- [9] Wu Yaping, Zhang Tianxu. Simulation of infrared image and the simulation software[J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(4): 1-3. (in Chinese)
- [10] Xuan Yiming, Han Yuge. Infrared Characterizations of Ground Targets and Backgrounds [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.