

地面目标红外立体特征

吕相银^{1,2}, 金伟^{1,2}, 杨莉^{1,2}

- (1. 电子工程学院 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 研究地面目标的红外立体特征, 有助于全面掌握目标红外特性的细节, 对红外热像的模拟、红外目标识别以及红外隐身设计等都有着重要的意义。文中通过对影响目标温度因素的定量分析, 建立了地面目标表面温度的一般数学模型。以一维导热微分方程为例, 计算了某建筑物墙壁不同方位的外表面温度在一天中随时间的变化关系, 并与实际测量值进行了比较。在此基础上, 最后对建筑物的红外辐射进行了理论计算和讨论。结果表明地面目标的红外立体特征在白天非常显著, 在晚上的立体特征则没有白天显著。

关键词: 地面目标; 温度; 红外辐射; 立体特征

中图分类号: TN976 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2810-05

Infrared stereo feature of ground target

Lv Xiangyin^{1,2}, Jin Wei^{1,2}, Yang Li^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The research of the infrared stereo feature of ground target is useful for describing the detail of infrared feature, and it plays an important role in the field of infrared image simulation, infrared target recognition and controlling the target infrared radiation to realize infrared camouflage and so on. In this paper, the various factors that influence the target surface temperature were analyzed, then the model for the calculation of target surface temperature was introduced. The relation between temperature and time for some building wall outside surface by daylight was calculated using one dimension heat conduction differential equation. It proves that the calculation method is correct according to the comparison between the result value and the measured value. On the basis of the calculation of temperature, the infrared radiation was calculated and discussed. The result shows that the infrared stereo feature of ground target is more obvious in day than in night.

Key words: ground target; temperature; infrared radiation; stereo feature

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-02-19

基金项目: 安徽省重点实验室主任基金(2010A001007D)

作者简介: 吕相银(1978-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电工程方面的研究。Email:lvxiangyin@sohu.com

0 引言

现代高科技战争中,地面重要政治、经济以及军事目标等都面临着被敌方精确制导武器打击的威胁,其中红外成像制导就是一种重要的精确制导方式,它是根据目标红外特征对目标进行寻的制导的。因此目标的红外特征进行红外目标识别以及红外隐身设计的基础。对于绝大部分的地面目标,都是由不同的面构成的。通常目标的红外特征就是由构成它的各个面的红外特征构成的。处于不同方位的各个表面,由于热量得失不同,其表面温度不同,红外特征也就不同。尤其是在白天,得到太阳辐射热量的面和得不到太阳辐射热量的面其红外辐射明显不同。因此要得到地面目标的红外三维立体特征,就要研究目标处于不同方位的各个表面的红外特征,重点是研究目标不同方位的温度特征。

1 地面目标表面温度特性

1.1 地面目标表面热量收支

目标表面的热量收支情况是决定目标温度分布的关键因素。其中地面目标表面热量收支主要取决于太阳辐射、地面辐射、大气辐射、自身辐射和空气对流五大因素。

(1) 接收的太阳辐射

太阳辐射一般可分为直射、散射和地面反射三部分^[1-5]。

目标接收的太阳直接辐射与目标方位有关。受太阳照射目标表面的温度将明显高于不受太阳照射表面的温度。任意一个目标表面接收到的太阳直接辐射的定量表达式为:

$$Q_{\text{sun dir}} = \alpha_{\text{sun}} r E_{\text{sun}} p^m F_{\text{sun}} \quad (1)$$

式中: α_{sun} 为吸收系数; r 为日地间距修正值; $E_{\text{sun}} = 1353 \text{ W/m}^2$; p 为大气透明系数; m 为大气质量; F_{sun} 为目标对太阳辐射角度因子。

目标接收的散射辐射为:

$$Q_{\text{sun dis}} = \frac{1}{2} \varepsilon E_{\text{sun}} \sinh \frac{1-p^m}{1-1.4 \ln p} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

式中: ε 为目标表面发射率。根据基尔霍夫定律,在工程上可以认为 $\varepsilon = \alpha_l$, α_l 为目标表面对长波辐射的吸收率。

目标接收的地面的射为:

$$Q_{\text{sun ref}} = \varepsilon \left[r E_{\text{sun}} p^m \sinh + \frac{1}{2} E_{\text{sun}} \sinh \times \frac{1-p^m}{1-1.4 \ln p} \right] \cdot \rho_{\text{ground}} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \beta \right) \quad (3)$$

式中: ρ_{ground} 为地面的太阳反射率。

所以目标表面接收到的太阳辐射为:

$$Q_{\text{sun}} = Q_{\text{sun dir}} + Q_{\text{sun dis}} + Q_{\text{sun ref}} \quad (4)$$

(2) 接收的地面辐射

目标接收到的地面辐射为:

$$Q_{\text{ground}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{ground}} \sigma T_{\text{ground}}^4 F_{\text{ground}} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{\text{ground}}$ 为地面发射率,由基尔霍夫定律可知 $\varepsilon_{\text{ground}} = 1 - \rho_{\text{ground}}$; T_{ground} 为地面温度; F_{ground} 为目标对地面辐射角度因子。

(3) 接收的大气辐射

目标表面接收到的大气辐射为:

$$Q_{\text{sky}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{sky}} \sigma T_{\text{sky}}^4 F_{\text{sky}} \quad (6)$$

式中: T_{sky} 为大气温度; F_{sky} 为目标对大气辐射的角系数; ε_{sky} 为大气发射率。

以上的计算是在晴空的条件下进行的。若是阴天,由于云层通常很低,则可以把云层等效为 263 K 左右的黑体。

综上所述,目标接收的总辐射热能为:

$$Q_{\text{rad}} = Q_{\text{sun}} + Q_{\text{ground}} + Q_{\text{sky}} \quad (7)$$

(4) 目标自身辐射

目标自身辐射为损失的热能,其表达式由 Stefan-Boltzmann 定律所描述:

$$Q_{\text{rado}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

(5) 目标与空气对流

目标与空气的对流换热为:

$$Q_{\text{conv}} = H(T_{\text{air}} - T) \quad (9)$$

式中: H 为对流换热系数; T_{air} 为随时间变化的空气温度,可将第 t 小时的气温 $T_{\text{air}}(t)$ 展开成傅里叶级数

$$T_{\text{air}}(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos w(t-b_1) + a_2 \cdot \cos 2w(t-b_2) \quad (10)$$

式中:角频率 $w = 2\pi/24$,采用最小二乘法可求出这些常数的值。

1.2 导热微分方程与边界条件

利用导热微分方程和边界条件可以求得目标表面温度的时空分布。在直角坐标系中的导热微分方程为^[6-7]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi_v \quad (11)$$

式中： ρ 为密度； c 为比热容； τ 为时间； k 为导热系数； Φ_v 为微元单位体积的发热功率。

对于大部分地面目标，都有着方舱式外壳的结构，其特点是没有内热源，而且平面高度和宽度远大于厚度，当没有内热源时，三维导热则可简化为一维导热：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

对于边界条件，由前面分析可得：

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{边界面}} = Q_{\text{radi}} - Q_{\text{rado}} + Q_{\text{conv}} \quad (13)$$

式中： n 为边界面法线方向。上式左边表示由目标表面向内部导热而损失的热量，右边表示由辐射和对流综合作用造成的目标表面得到的热量。

由于材料结构的不同，车体外壳、路面以及建筑物墙壁内部等一般都具有明显规则的分层特征。对于层与层之间的接触边界，由能量守恒可知接触面上的温度和热流密度都应保持一致，即

$$T_1 = T_2 \Big|_{\text{边界面}}, k_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{\text{边界面}} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\text{边界面}} \quad (14)$$

公式(14)也通常被称为第四类边界条件。

1.3 数值计算与分析

(1) 数值计算

数值计算首先要进行时空域的离散。对于方舱式车体外壳、建筑物壁面和路面，可分为 n 个薄层，令 $t = k\Delta\tau$ ，则 t 时刻第 i 个薄层的中心温度可表示为 $T(k, i)$ 。

由此内节点差分方程为：

$$\rho c \frac{T(k+1, i) - T(k, i)}{\Delta\tau} = k \frac{T(k+1, i+1) + T(k+1, i-1) - 2T(k+1, i)}{(\Delta x)^2} \quad (15)$$

对于边界节点，需要利用能量平衡方法推出节点方程为：

$$\rho c \frac{T(k+1, 0) - T(k, 0)}{\Delta\tau} \cdot \frac{\Delta x}{2} = k \frac{T(k+1, 1) - T(k+1, 0)}{\Delta x} + Q_{\text{radi}}^{k+1} + H[T_{\text{air}}^{k+1} - T(k+1, 0)] - \varepsilon\sigma T^4(k+1, 0) \quad (16)$$

对于内表面节点方程通常可以忽略辐射项，若不能忽略辐射项，则要复杂的多，具体方法见参考文献[8]。对于初始条件，计算通常从凌晨开始，此时可

以认为车体或壁体温度沿厚度方向近似成线性分布，即：

$$T(0, i) = T_2 + i \frac{T_1 - T_2}{n} \quad (i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

式中： T_1 和 T_2 分别为内外表面初始温度。

把所有节点差分方程联立并求解，可得各个薄层温度的时间变化特性，而从研究目标红外特性的目的来讲，最为关心的是外表面温度值，而 $T(k, 0)$ 就是最终所要求解的外表面温度值。

在联立方程组迭代计算时，可利用泰勒公式对辐射项的温度四次方作线性化处理

$$T^4(k+1, i) = 4T^3(k, i)T(k+1, i) - 3T^4(k, i) \quad (18)$$

(2) 结果与讨论

由以上理论分析可见，当目标的各个表面处于不同方位时，其所接收到的热量将不同，表面温度和红外辐射特征也就不一样。对目标几个不同方位的表面（一般可取典型的东、南、西、北四个方位的表面）同时进行计算和测试，就可以掌握目标各个表面的红外特征，进而可以描绘出目标的红外立体特征。图 1 示出了对某建筑物不同方位表面温度的计算结果以及间隔时间为一小时的实际测量数据。

由图 1 可以看出，在一天中建筑物不同方位的表面温度变化情况是不一样的，方位正东表面由于最先得到太阳的辐射温度迅速升高，到接近中午的 10 点钟左右达到最高值，之后由于得不到太阳直接辐射，温度开始呈迅速下降趋势，但下降一段时间后温度在午后三到四点钟又有缓慢的微小上升，这主要是因为在这时的空气温度以及大气散射、地面反射等热量达到最大值，造成了温度的回升，由于幅度很微小，实测数据没有显示出来。方位正南表面大部分时间都能得到太阳直射热量，从早上温度开始上升，一直持续到 13 点左右达到最大值，之后由于太阳辐射减弱，温度开始呈下降趋势。方位正西表面由于在午后才能得到太阳的直射热量，故直到午后 15 点钟左右才达到最高值，之后开始呈下降趋势。北向壁面由于始终没有得到太阳的直射热量，所以温度变化比较平缓，只是在空气温度以及大气散射、地面反射等热量在午后 14 点钟左右达到最大值时，温度才达到一天中的最高值，但是与其他方向的壁面比较，其温度浮动非常小。

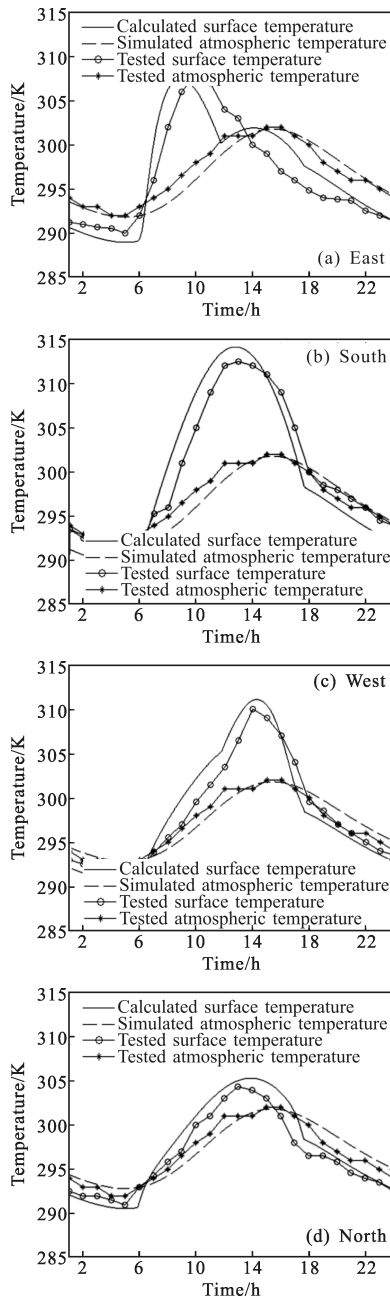


图 1 建筑物表面温度计算曲线

Fig.1 Calculated temperature for the building surface temperature

综合各个方位表面的温度变化,在白天时由于方位不同,其温度变化也明显不同,故不同的表面其红外辐射必然不同,从各个不同的方位来看将呈现比较明显的立体特征。在晚上各个方位的表面温度波动幅度不大,接近达到平衡状态,不同方位表面温度差别不大,从各个不同的方位来看,其立体特征将没有白天明显。

2 目标红外辐射计算与分析

目标红外辐射主要由其自身发射的红外辐射和

反射的环境红外辐射两部分构成。

目标在全电磁波段的总辐射出射度为:

$$M = \epsilon \sigma T^4 \tag{19}$$

在 $\Delta\lambda$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的辐射出射度为:

$$M = \int_{\Delta\lambda} \epsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \tag{20}$$

目标大都可视为朗伯体,辐射亮度可由漫辐射源特性得

$$L_s = \frac{M}{\pi} \tag{21}$$

(2) 反射辐射

目标对环境的反射辐射为:

$$M_r = \rho_e Q_r \tag{22}$$

式中: ρ_e 为反射系数; Q_r 为外界对目标的辐射。目标反射的辐射亮度为:

$$L_r = \frac{M_r}{\pi} \tag{23}$$

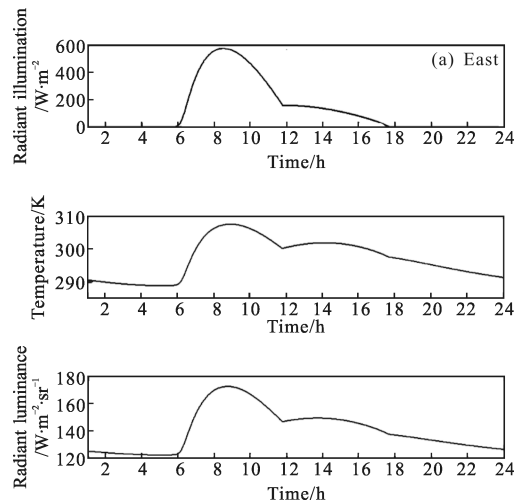
目标总辐射亮度为:

$$L = L_s + L_r \tag{24}$$

(3) 计算结果

图 2 示出了建筑物不同方位表面的辐射亮度在一天 24 小时中的变化曲线。为了便于分析,图中同时示出了太阳辐射和表面温度的变化。

由图 2 可以看出,建筑物不同方位的红外辐射在一天中的变化特点是不相同的,但是其变化都与相应方位的温度在一天中的变化趋势基本一致。在白天主要是受太阳的影响,当傍晚来临太阳辐射消失后,目标表面温度和辐射亮度慢慢降低并逐渐接近平衡状态,直到次日黎明再次接收到太阳辐射。



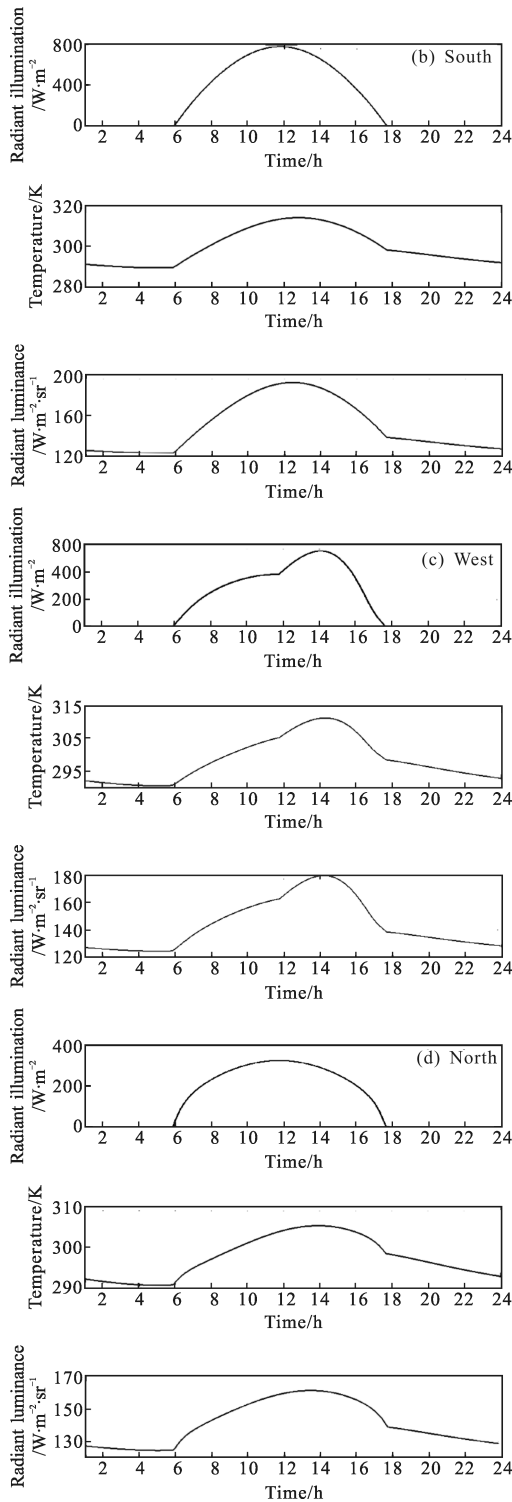


图 2 建筑物不同方位辐射亮度曲线

Fig.2 Calculated radiation luminance for different azimuth of building

图 3 是用热像仪实拍的某建筑物红外图像。由图可以看出在白天受阳光照射的顶面和一个侧面其红外辐射较强,不受阳光照射的侧面其红外辐射较弱,立体特征显著;在晚上不同侧面的红外辐射相差

不大,立体特征不明显。它直观地验证了文中目标温度和红外辐射计算模型的合理性。

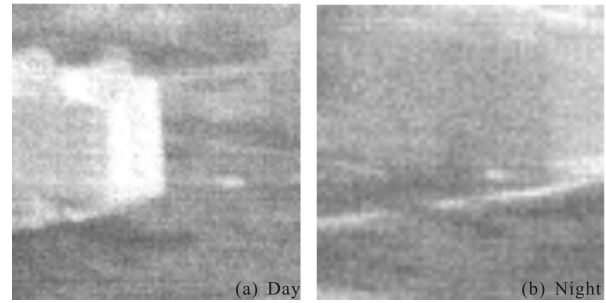


图 3 某建筑物红外图像

Fig.3 Infrared image of building

3 结束语

由以上分析,可以得出地面目标红外立体特征为:在白天的同一时刻,不同方位的辐射亮度差异较大,将呈现出明显的立体特征,而在晚上,不同方位的红外辐射亮度差异比较小,立体特征大大减弱,趋于一种平面式的特征。

参考文献:

- [1] Yan Qisen, Zhao Qingzhu. Heat Process of Buildings [M]. Beijing: Chinese Architecture Press, 1986. (in Chinese)
- [2] Lv Xiangyin, Ling Yongshun, Huang Chaochao. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (5): 563-567. (in Chinese)
- [3] Lou Heli, Zhao Erbo, Lv Xiangyin. Analysis of city target and background temperature characteristics and their influence factors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (10): 2817-2823. (in Chinese)
- [4] Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu. Infrared radiation contrast between ground target and background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 2002-2007. (in Chinese)
- [5] Xuan Yimin, Han Yuge. Infrared Characterizations of ground targets and backgrounds [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [6] Zhao Zhennan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [7] Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [8] Robert Siegel, John R. Howell Thermal Radiation Heat Transfer [M]. Hemisphere and McGraw-Hill, 1981.