

文章编号:1001-5078(2007)04-0335-03

电热膜红外假目标热特性分析

陈宏烨, 曾朝阳, 解文彬, 卢俊宇, 朱超
(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007)

摘要:讨论了电热膜在自然环境下的热红外特征, 分析不同热性质材料对电热膜温度的影响。通过有限差分方法求解热平衡方程证实: 低的短波吸收系数有利于减小电热膜与真目标在白天的温度差异, 而低辐射系数有利于减小夜间温度差异。不过, 即使使用同时具有低短波吸收系数和低红外辐射系数的材料, 电热膜也不能满足所有时段与真目标有近似的热特征, 必须在温度低的时段对电热膜加热。

关键词:红外假目标; 电热膜; 有限差分法; 传热分析

中图分类号: TN976 **文献标识码:**A

Thermal Characteristic Analysis for Electric Heating Film as Infrared Decoy

CHEN Hong-ye, ZENG Zhao-yang, XIE Wen-bin, LU Jun-yu, ZHU Chao
(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: The infrared feature of electric heating film in natural environment is discussed, with the focus on the impact of different heat properties. On the basis of finite-difference solution to the thermal diffusion differential, it is confirmed that: low short wave absorption helps to decrease the temperature difference in the date time between electric heating film and real target, while low infrared emission can decrease the temperature difference in the night. However, complete similarity of diurnal heat behavior between electric heating film and real target can not be reached only by material selection, so it is necessary to heat the electric heating film when its temperature is low.

Key words: infrared decoy; electric heating film; finite difference method; heat transfer analysis

1 引言

大多数的军事目标红外辐射较强, 红外特征非常明显, 所以利用目标自身的热辐射的红外侦察已经成为一种重要的侦察手段, 而红外制导更是成为了主要的精确制导方式。为了对抗红外侦察和制导, 人们提出了各种各样的方法。假目标是对抗侦察和制导的一种很有效的方法, 而假目标为了使用方便, 往往采用轻便、廉价的材料, 这些材料可以很容易地在可见光波段与真目标一致。但是由于其热性质与真目标有很大的不同造成在白天日照强时温度高, 红外辐射强, 晚上日照弱时温度低, 红外辐射弱, 导致其红外特征不能和真目标一致。所以需要采取一些辅助性的措施, 这些措施包括加热升温和制冷降温。然而这些措施在协助达成示假目的的同时, 也带来了能耗高、控制难以及系统复杂化等一系列问题。如何能够实现低能耗、易于控制的简单的

辅助系统一直是红外假目标的研究热点。在此考虑用电热膜来制作目标, 通过控制电热膜的温度来实现其与真目标温度的一致。电热膜具有控温方便、升温迅速、热转换效率高等特点, 还具备良好的力学(柔软可折叠)和加工(电阻可调)性能, 是备受关注的新型便捷式红外热源。考虑到电热膜在控制和能耗方面的巨大优势, 以下从传热学的角度分析其作为红外示假材料的可行性。

2 基本模型

目标的热红外特征取决于目标的表面温度及红外发射率。红外发射率是材料的特性, 在通常情况下可以认为是常数。而物体的温度往往与其所处环境密切相关, 室外环境下目标的温度是时间的函数,

作者简介: 陈宏烨(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为伪装理论与技术。E-mail: chenhongye@gmail.com
收稿日期: 2006-09-08

而且天候、气象以及目标的工作状态都是目标温度的影响因素。从传热的角度,可以将影响目标红外特性的热物理过程分成两部分,即目标内部的热传导和目标表面-大气边界层之间的热交换。

精确求解传热方程的任何一个过程都是不现实的,通行的作法是忽略平行于表面的热传导^[1-3],这时传热方程简化为一维方程。在目标内部,方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + Q_{\text{source}} \quad (1)$$

式中, T 、 z 、 Q 分别为目标内部一点的温度、离开目标表面的距离以及目标内部的热源; t 为时间; k 为目标的热扩散系数。其中:

$$k = \lambda_e / \rho c \quad (2)$$

式中, λ_e 为构成目标材料的热导率; ρ 和 c 分别为目标的密度和比热。而在目标表面,热流呈净流入或流出状态,即:

$$\lambda_e \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{\text{表面}} = Q(t) \quad (3)$$

式中, $Q(t)$ 为表面的热流,其取值取决于目标-大气边界的能量传输。在目标-大气边界发生的能量交换,可以表示为:

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{\text{表面}} = \alpha E_{\text{sun}} + \alpha_1 E_{\text{sky}} - \varepsilon \sigma T^4 \pm Q_e \pm Q_{\text{ec}} \quad (4)$$

式(4)右边的几项分别为目标吸收的太阳辐射、目标吸收的大气(天空)长波辐射、目标自身辐射、在目标表面发生的对流换热以及冷凝或蒸发的潜热交换。太阳辐射度为:

$$\alpha_s E_{\text{sun}} = \alpha_{\text{sd}} S_n + \alpha_{\text{sf}} D_h \quad (5)$$

式中, S_n 为法向方向的直射辐照度; D_h 为散射的入射辐照度。忽略 α_{sd} 和 α_{sf} 之间的差别,太阳辐射可以简单记为:

$$\alpha_s E_{\text{sun}} = \alpha (S_n + D_h) \quad (6)$$

大气长波辐射可以表示为:

$$E_{\text{sky}} = \sigma T^4 (0.51 + 0.208 \sqrt{e_a}) \quad (7)$$

式(7)中参数分别是 Stefan-Boltzman 常数、气温和水蒸气压强(kPa)。

对流换热取决于风速,通常可以写成表面换热系数 m 、物体表面温度 T_s 以及气温 T 的函数:

$$Q_e = m(T_s - T) \quad (8)$$

潜热交换对于湿度不特别大的情况下的人工目标,可以忽略不计。

对于下表面而言,边界条件可以写成和上表面相似的形式,但应该排除太阳的辐射,取而代之的是目标下面地面的辐射。于是,下表面的热平衡方程为:

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{\text{下表面}} = \alpha E_{\text{er}} + \alpha_1 E_{\text{sky}} - \varepsilon \sigma T^4 \pm Q_e \pm Q_{\text{ec}} \quad (9)$$

3 模型离散化

为便于计算,传热方程必须离散化。在有限差分模型下,对一维传热方程的离散化是这样进行的:将目标沿垂直表面的方向均匀划分成 N 个薄层,每一薄层的边界是需计算的结点,其温度记为 t_n^i ;上下标分别代表层数和时间点。将扩散项取中心差分,而非稳态项取向前差分,在目标内部,结点的传热离散方程为:

$$t_n^{i+1} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{n+1}^i + t_{n-1}^i) + \left(1 - \frac{2\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2}\right) t_n^i \quad (10)$$

其中, $\alpha = \lambda / \rho c$ 是材料的热扩散率;而 Δx 和 $\Delta \tau$ 分别是薄层的厚度和离散的时间间距。 Δx 和 $\Delta \tau$ 应该足够小,以保证数值求解的稳定性,并确保计算结果对 Δx 和 $\Delta \tau$ 的取值不敏感。

在材料的表面,由于外界热流的存在,以及没有前续或后续的结点,使得结点的离散方程不同:

$$t_0^{i+1} = \frac{2q \Delta \tau}{\rho c \Delta x} + t_0^i - \frac{2\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_0^i - t_1^i) - \frac{2\Delta \tau \varepsilon \sigma (t_0^i)^4}{\rho c \Delta x} \quad (11)$$

式中, q 为外界与目标的热交换功率。对于上表面有:

$$q = \alpha E_{\text{sun}} + \alpha_1 E_{\text{sky}} \pm Q_e \quad (12)$$

而对于下表面有:

$$q = \alpha E_{\text{eth}} + \alpha_1 E_{\text{sky}} \pm Q_e \quad (13)$$

至此,传热模型就完全建立起来。在此模型的基础上可以分析电热膜的热特性。尽管传热模型是热特性分析的基础,然而由于实际传热因素的复杂化和随机性,以及大量参数难以精确取值,单纯地依靠传热模型是不可靠的。合适的方法是将传热模型与适当的实际测量结合起来,以测量数据优化相关参数,而将计算结果作为测量结果的补充。

4 计算结果与分析

由于电热膜的热容很小,这样电热膜就可以用很小的加热功率方便而迅速地控制其温度。在此基础上利用数值计算分析野外环境下电热膜的温度昼夜变化,关注的重点是日照、大气传导、电热膜发热功率以及电热膜本身的热特性参数等因素对电热膜温度的影响。

在此考虑在南京7月份的晴朗天气下,假设电热膜的密度为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,比热 $c = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,导热系数 $\lambda = 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,电热膜的厚度为 2.5mm。真目标的材料为钢铁,密度 $\rho = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$,比热 $c = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,导热系数 $\lambda = 20 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,厚度为 20cm。计算其在一天内的温度变化情况,如图1所示。

从图1中可以看出,从0时到早上7时,电热膜的温度与真目标的温度差别不大。当太阳出来以后,受日照的影响,电热膜的温度上升比背景要快,达到最高温度时间比背景早。最高的温差几乎达到10℃。而下午日照渐弱时,又出现了相反情况,电热

膜温度下降快,低于背景的温度。这是由于电热膜的热惯量很小,导致其温度随着环境的变化而变化速度很快。为了改变这种情况,可以改变材料,增大其热惯量,但是由于电热膜很薄(在计算中是2.5mm,实际应用可能更小),改变材料也不能使其有所改观,所以这种方法不可行。另外就是对电热膜的表面进行处理,改变其吸收和辐射特性。改变电热膜的吸收性能,能够影响它在日照下的温度变化。而电热膜的辐射特性将影响其在日照较弱情况下的降温过程。将电热膜的发射率从0.8降到0.6,计算结果如图2所示。降低发射率以后在下午16时以后电热膜温度下降比较慢,与背景差别很小。

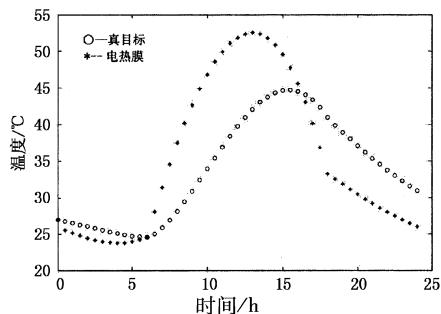


图1 电热膜与真目标昼夜温度变化

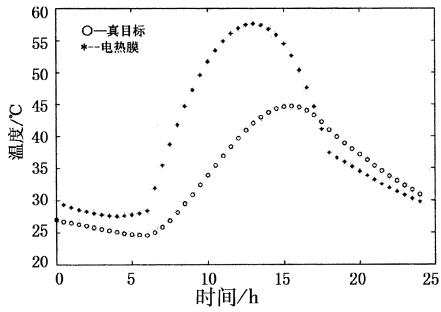


图2 低发射率电热膜的温度昼夜变化

降低发射率虽然使午后的温度与真目标相似,但是由于太阳吸收率没有变化,上午的温度变得更高,所以在降低发射率的同时还要降低太阳吸收率。图3即为低发射率低太阳吸收率的温度昼夜变化。从图中可以看出,电热膜温度有了大幅度的下降,但是发射率的降低导致了视在温度的变化,在晚上和下午都明显低于背景的温度。

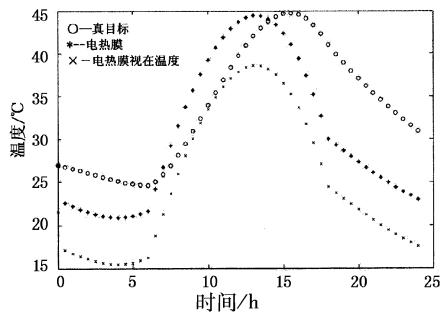


图3 低发射率、低太阳吸收率电热膜的实际温度和视在温度昼夜变化

上面这个结果正是我们所期望的,在电热膜温度低于真目标温度时我们就开启电源,对电热膜加热,使其温度上升,并且可以在不同的时段改变加热功率来控制温度的上升,从而使电热膜在全天时段的温度可以基本上与真目标温度一致,如图4所示。由此说明利用电热膜覆盖目标,控制电热膜的温度变化使其与真目标保持一致,达到在红外波段示假目的,这种方法是可行的。

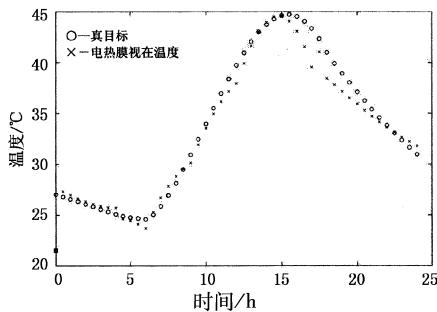


图4 改进后的电热膜温度昼夜变化

5 结束语

本文利用传热模型,考虑太阳辐射、大气辐射、空气对流热交换等环境因素的影响,采用有限差分法对电热膜的昼夜温度变化进行计算,对计算结果进行分析,得出下面的结论:用电热膜制作假目标,由于其热惯量小,温度随环境变化速度快,在白天日照强时大大高于真目标温度,而下午和晚上又迅速下降,低于真目标温度,没有示假效果。通过降低电热膜的发射率和太阳吸收率,使电热膜在日照强时降温,调整电热膜的加热功率,使其在温度低时升温,从而使电热膜在全天时段可以和真目标温度保持相似。文中仅仅是从理论上证明了利用电热膜实现红外假目标的可行性,仍然需要通过实验来进一步研究。

参考文献:

- [1] P A Jacobs. 地面目标和背景的热红外特性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 章熙民,任泽需,梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [3] J S Accetta, D L Shumaker. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. SPIE, 1993.
- [4] H E Bennett, et al. Distribution of infrared radiance over a clear sky[J]. Journal of the Optical Society of America. 1960, 50(2): 100–106.
- [5] F Grum, R Becherer. Optical radiation measurements [M]. London: Academic Press, 1979.
- [6] N Ben-Yosef, Wilner I Fuchs, S Simhony, et al. Natural terrain infrared radiance statistics: daily variations [J]. Applied Optics, 1985, 24(23): 4167–4171.
- [7] L Wartena, et al. Checking of some formulae for the calculation of long-wave radiation from clear skies [J]. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 1973(21): 335–348.