

文章编号:1001-5078(2007)09-0852-04

## 伪装遮障热红外辐射温度计算

曹 义<sup>1</sup>,程海峰<sup>1</sup>,郑文伟<sup>1</sup>,才鸿年<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073;2. 兵器装备集团公司,北京 100081)

**摘 要:**文中建立了伪装遮障的室内测试模型与野外使用模型,并给出了不同模型伪装遮障热红外辐射温度的计算方法。该计算方法基于辐射传热分析,比原有方法更合理。室内测试模型可作为热像仪测量伪装遮障表面发射率的参考;野外使用模型可作为伪装遮障表面发射率设计和伪装效果预估的参考。

**关键词:**伪装遮障;热红外;辐射温度

**中图分类号:**TN976 **文献标识码:**A

## Calculation of Camouflage Screen's Thermal IR Radiation Temperature

CAO Yi<sup>1</sup>, CHENG Hai-feng<sup>1</sup>, ZHENG Wen-wei<sup>1</sup>, CAI Hong-nian<sup>1,2</sup>

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. China South Industries Group Corp., Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this article, an indoor test model and an outdoor model of camouflage screen are established. The calculation methods for figuring out the thermal IR radiation temperature of the models are introduced. The methods derived from heat transfer theory are more reasonable than the former equation. The indoor test model is suitable for camouflage screen's emissivity test. The outdoor model is helpful to camouflage screen design and camouflage efficiency predicting.

**Key words:** camouflage screen; thermal IR; radiation temperature

### 1 引 言

红外热成像测温技术具有非接触、直观、灵敏度高、快速、安全等优点,在传染病防控、高压电线巡检、火灾的探测和传热研究等民用领域得到广泛的应用。红外热成像测温一般在室内进行,关心的是由热像仪测得的辐射温度计算样品表面的真实温度。辐射温度与真实温度的关系一般采用下式计算<sup>[1-3]</sup>:

$$T_r^n = \tau_a [\varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n] + \varepsilon_a T_a^n \quad (1)$$

其中, $T_r$ 为辐射温度; $T_0$ 为真实温度; $T_u$ 为环境温度; $T_a$ 为大气温度; $\varepsilon$ 为样品表面发射率; $\tau_a$ 为样品

到热像仪间大气透射率; $\varepsilon_a$ 为大气发射率; $n$ 为指数,热像仪工作波段8~14 $\mu\text{m}$ 时约为4。

当热像仪与样品表面相距较近,且工作波段为大气窗口时, $\tau_a \approx 1$ , $\varepsilon_a \approx 0$ ,公式(1)简化为公式(2)<sup>[4-5]</sup>:

$$T_r^n = \varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n \quad (2)$$

与热红外成像测温相反,热红外伪装技术中关心的是目标的辐射温度,往往通过控制目标表面的

**作者简介:**曹 义(1978-),男,博士生,研究方向为伪装与隐身技术。E-mail:mudtcy@sina.com

**收稿日期:**2007-03-05

真实温度和发射率来控制目标辐射温度,使其与背景趋于一致。

对于室外伪装目标的辐射温度计算,公式(1)、公式(2)陷入了困境。首先是环境温度  $T_u$  的定义不明确;其次,辐射温度与热像仪位置有关,  $\tau_a, \epsilon_a$  确定较困难,且由于大气温度随海拔高度变化,热像仪位于高空时  $T_a$  不是定值。

王自荣<sup>[6]</sup>等给出了根据目标本身辐射和天空辐射计算有效辐射出射度求目标辐射温度的方法,但未考虑地面辐射的影响。

本文建立了伪装遮障的室内测试模型与野外使用模型,采用传热学的方法计算其辐射温度。室内测试模型可作为热像仪测量目标表面温度、发射率的参考;野外使用模型进一步考虑了地物背景对目标辐射温度的影响,可作为伪装遮障设计的参考。

## 2 伪装遮障热红外辐射温度的计算方法

### 2.1 伪装遮障计算模型的建立

本文建立了两个伪装遮障模型,分别模拟伪装遮障室内测试与野外使用时的情况。

伪装遮障室内测试模型如图1(a)所示,伪装遮障展平挂满一面竖直墙,房间长宽均为5m,高3m。

伪装遮障在野外使用时一般从车辆等装备顶部斜拉至地面,由地桩固定,以遮盖目标直线轮廓和消除地面阴影。设伪装目标高3m,伪装遮障与水平面成45°,遮障前地面与水平面成 $\theta$ 角, $\theta$ 角的大小可模拟遮障与地物的靠近程度。野外使用模型如图1(b)所示。其中, $L_1$ 是地面; $L_2$ 是伪装遮障面; $L_3$ 是连接伪装遮障最高点与地面最高点的假想水平面。

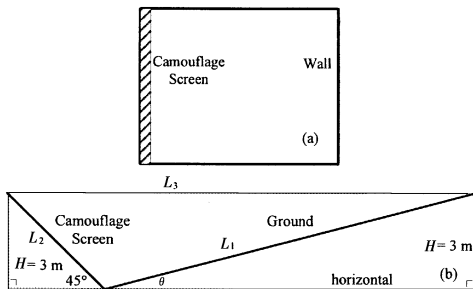


图1 伪装遮障的计算模型

Fig.1 calculating model of camouflage screen

### 2.2 伪装遮障辐射温度计算

目标表面除了因本身的温度特性向外界发出本

身辐射外,还反射周围物体投射到目标表面上的投射辐射,本身辐射与反射辐射之和称为有效辐射出射度,记为  $J$ 。根据目标的有效辐射出射度计算辐射温度,能更真实地反映目标表面的辐射情况,且避免了对热像仪的讨论。

由普朗克定律,温度为  $T$  的黑体在波长范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  之间的辐射出射度为<sup>[7-8]</sup>:

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (3)$$

其中, $T$ 为黑体温度; $K$ ;  $c_1, c_2$ 为常数; $\lambda$ 为波长。

设伪装遮障的有效辐射出射度为  $J_t$ ,背景有效辐射出射度为  $J_b$ 。解方程(4)、(5)可分别求得伪装遮障与背景的辐射温度  $T_{tr}, T_{br}$ :

$$M(T_{tr}) = J_t \quad (4)$$

$$M(T_{br}) = J_b \quad (5)$$

要解上述方程必须先求出  $J_t, J_b$ 。

对于室内测试模型,室内空气体积有限,不计其辐射;伪装遮障(面积为  $A_t$ )与房间地面及侧面、对面墙壁(总面积为  $A_b$ )进行辐射换热,可简化为两个灰体表面组成的封闭腔辐射换热计算<sup>[8]</sup>,伪装遮障的有效辐射出射度由式(6)计算:

$$J_t = M(T_t) - (1 - \epsilon_t) \frac{M(T_t) - M(T_b)}{1 + \frac{A_t}{A_b} \left( \frac{\epsilon_t}{\epsilon_b} - \epsilon_t \right)} \quad (6)$$

其中, $J$ 为有效辐射出射度; $T_t$ 为伪装遮障的真实温度, $K$ ;  $T_b$ 为背景的真实温度, $K$ ;  $\epsilon$ 为表面发射率; $A$ 为面积;下标  $t, b$ 分别表示伪装遮障与背景。

对于图1(b)中野外使用模型,地面  $L_1$ 、伪装遮障面  $L_2$ 通过水平面  $L_3$ 与天空背景进行辐射换热,  $L_3$ 平面的下行辐射出射度等于天空背景对水平面的辐照度  $E_s$ ,且水平面  $L_3$ 不反射  $L_1, L_2$ 的红外辐射,所以可认为  $L_3$ 的发射率为1。天空背景对水平面辐照度受云量等因素影响,其测量方法参考文献[9],本文计算中引用文献[6]提供的数值,8~14 $\mu\text{m}$ 波段  $J_s = E_s = 17\pi\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。假设图1(b)中伪装遮障面与地面在垂直纸面方向无限长。对于  $L_1, L_2, L_3$ 组成的封闭腔,其有效辐射出射度可由方程组(7)解出<sup>[8]</sup>。角系数  $X_{b,t}$ 定义为离开表面  $b$ 的

辐射能被表面 t 所拦截的份额。

$$\begin{cases} \frac{M(T_b) - J_b}{1 - \varepsilon_b} + \frac{J_t - J_b}{L_1 X_{b,t}} + \frac{J_s - J_b}{L_1 X_{b,s}} = 0 \\ \frac{M(T_t) - J_t}{1 - \varepsilon_t} + \frac{J_b - J_t}{L_1 X_{b,t}} + \frac{J_s - J_t}{L_2 X_{t,s}} = 0 \\ J_s = 17\pi \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$X_{b,t} = \frac{L_1 + L_2 - L_3}{2L_1} \quad (8)$$

$$X_{b,s} = \frac{L_1 + L_3 - L_2}{2L_1} \quad (9)$$

$$X_{t,s} = \frac{L_2 + L_3 - L_1}{2L_2} \quad (10)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 室内测试模型分析

对室内测试模型,假设伪装遮障 8~14 $\mu\text{m}$  波段发射率为  $\varepsilon_t = 0.50$ ; 墙壁、地面发射率  $\varepsilon_b = 0.90$ , 真实温度为  $T_b = 298.00\text{K}$ ; 由图 1(a) 求得  $A_t/A_b = 3/19$ 。由式(3)、式(4)与式(6)可解出伪装遮障不同真实温度为  $T_t$  对应的 8~14 $\mu\text{m}$  波段有效辐射  $J_t$ 、辐射温度  $T_r$ , 如表 1 所示。表中还列出了由式(2)计算得出的结果, 计算时环境温度取  $T_u = T_b = 298.00\text{K}$ , 指数  $n = 4.00$ 。

表 1 伪装遮障室内测试模型辐射温度

Tab. 1 radiation temperature of the indoor test model

true temperature ( $T_t/\text{K}$ )	effective radiation ( $J_t/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	radiation temperature ( $T_r/\text{K}$ )	result of equation(2) ( $T_r/\text{K}$ )
273.00	138.49	286.19	286.32
283.00	149.15	290.71	290.79
293.00	160.98	295.51	295.53
298.00	167.35	298.00	298.00
303.00	174.02	300.55	300.53
313.00	188.26	305.81	305.78

由表(1)可以看出,室内测试模型的计算结果与式(2)比较吻合,说明室内测试模型与式(2)一样适用于室内测试计算,式(2)中环境温度  $T_u$  应取封闭伪装遮障的墙面温度。比较而言,本文的方法基于传热计算,考虑了墙面的发射率和面积等因素,所得结果应比式(2)更准确。

对于室内测试模型,还可得出一些结果如下:

①当  $\varepsilon_t < 1, T_t < T_b$  时,伪装遮障辐射温度大于真实温度,如表(1)中  $T_t = 273.00\text{K}$  时,  $T_r = 286.19\text{K}$ ; ②当  $T_t = T_b$  时,伪装遮障辐射温度与其发射率无关,且  $T_r = T_t = T_b$ ; ③当  $T_t < T_b$  时,伪装遮障的发射率  $\varepsilon_t$  较小时辐射温度反而较高,如  $T_t = 293.00\text{K}$ ,  $T_b = 303.00\text{K}$  时,求得发射率为 0.50, 0.80 的遮障表面辐射温度分别为 298.07K, 295.05K。

室内测试模型中,只要精确测出伪装遮障表面与墙面真实温度,知道墙面发射率,即可根据热像仪测出的辐射温度求出遮障的发射率。

#### 3.2 野外使用模型分析

野外使用模型中作如下假设:①伪装遮障与地面背景真实温度取夏季某次实验中接触式点温计的实测值,其中地面温度取植被温度,  $T_t = 312.00\text{K}$ ,  $T_b = 303.00\text{K}$ ; ②野外背景中树叶、草、石片、泥土、水泥片 8~14 $\mu\text{m}$  波段的发射率约为 0.92<sup>[9-10]</sup>, 取背景发射率  $\varepsilon_b = 0.92$ ; ③图 1(b) 中地面与水平面夹角  $\theta$  取 30°与 0°, 当  $\theta = 0^\circ$  时,认为相距足够远的地面不影响伪装遮障辐射温度,取  $L_1 = 1000H = 3000\text{m}$ ,  $L_3 = [(L_1 + H)^2 + H^2]^{1/2}$ 。

根据以上假设,由 2.2 节介绍的方法求出不同发射率伪装遮障 8~14 $\mu\text{m}$  波段的辐射温度,如表 2 所示。

表 2 伪装遮障野外使用模型辐射温度

Tab. 2 radiation temperature of the outdoor model

emissivity ( $\varepsilon$ )	radiation temperature $T_r/\text{K}(\theta = 0^\circ)$	radiation temperature $T_r/\text{K}(\theta = 30^\circ)$	difference/K
0.10	258.83	264.62	5.79
0.20	266.49	271.23	4.74
0.30	273.50	277.36	3.86
0.40	279.99	283.10	3.11
0.50	286.06	288.51	2.45
0.60	291.78	293.64	1.86
0.70	297.19	298.53	1.34
0.80	302.35	303.20	0.85
0.90	307.23	307.68	0.45
1.00	312.00	312.00	0.00

地物背景相对位置影响伪装遮障的辐射温度,地物位置与遮障较靠近时辐射温度较高。低发射率表面由于对热红外的高反射,受地物影响最大,如伪装遮障发射率为 0.50,网前地面与水平面夹角为 0°和 30°时,辐射温差达 2.45K。

对于野外使用模型,由表2可知,当背景温度与伪装遮障温度不相等时,不同发射率的伪装遮障具有不同的辐射温度。而地面背景温度与伪装遮障温度相等时,发射率不同的遮障表面仍具有不同的辐射温度。如野外使用模型中设  $T_t = T_b = 303.00\text{K}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $\varepsilon_b = 0.92$ , 伪装遮障的发射率为 0.50, 0.70, 0.90 时,求得对应的辐射温度分别为 282.98K, 291.47K, 299.29K。这是野外使用模型与室内测试模型的主要差别,也说明式(2)不适用于野外使用模型的计算。

野外使用模型模拟伪装遮障的实际使用情况,可以作为伪装遮障发射率设计和伪装效果预估的参考。下面以发射率设计说明其应用。

### 3.3 伪装遮障发射率下限计算

利用野外使用模型可进行伪装遮障的发射率设计。伪装遮障的发射率确定可分两种情况<sup>[11]</sup>讨论:深夜至日出前,遮障表面温度与气温、植被等地物背景基本相等,由于背景的发射率高,所以此时遮障发射率须大于某一临界值才能保证与背景辐射温差小于4K,由此可确定发射率下限值;白天日照下,遮障表面温度大于植被等背景温度,其发射率须小于某一临界值,根据白天真实温差可确定发射率上限值。下面说明发射率下限值的确定方法。

考虑到遮障使用时附近常有高大树木、斜坡等地物,野外使用模型中取  $\theta = 10^\circ$ ;背景发射率  $\varepsilon_b = 0.92$ 。令  $T_t = T_b = T_a$ ,根据  $T_{br} - T_{tr} \leq 4\text{K}$ ,求得不同气温下允许的发射率下限值如图2所示。

根据图2,伪装遮障真实温度越高,允许的发射率下限值越高。我国南方夜间气温  $T_a$  变化范围大致在  $0^\circ\text{C}$  至  $30^\circ\text{C}$  之间,伪装遮障平均发射率大于 0.80 可满足夜间伪装要求。

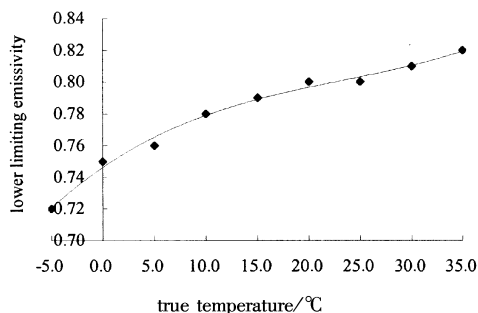


图2 伪装遮障发射率下限值与温度关系

Fig.2 lower limiting emissivity at different temperature

## 4 结论

本文建立了伪装遮障室内测试模型和野外使用

模型,分别给出了这两种模型的辐射温度计算方法,并通过算例得出如下结论:

(1)本文提供的计算方法是合理的。室内测试模型所得结果与相关文献提供的简化公式计算结果具有一致性;野外测试模型计算结果表明地面背景对装备侧面低发射率伪装遮障的辐射温度影响较大,文献[6]考虑天空辐射给出了装备顶部遮障辐射温度的计算方法,本文是对文献[6]的补充。

(2)伪装遮障的辐射温度除与其真实温度、发射率有关外,还取决于其所处的环境。低发射率表面由于热红外波段的高反射,受环境影响大。

(3)根据野外使用模型中地物背景发射率 0.92,天空辐照度  $17\pi \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,夜间伪装遮障与地面背景真实温度相等时,遮障平均发射率大于 0.80 可满足伪装要求。

### 参考文献:

- [1] 张健,杨立,刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术,2005,27(5):419-422.
- [2] 于波,季玉茹,金光熙. 红外热像测温中真实温度的计算[J]. 吉林化工学院学报,2004,21(1):89-91.
- [3] 杨立,寇蔚,刘慧开,等. 热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J]. 激光与红外,2002,32(1):42-45.
- [4] Terumi Inagaki, Yoshizo Okamoto. Surface temperature measurement near ambient conditions using infrared radiometers with different detection wavelength bands by applying a grey-body approximation: estimation of radiative properties for non-metal surfaces[J]. NDT&E International,1996,29(6):363-369.
- [5] 朱德忠,冯西轴. 电子玻璃料滴表面温度测量[J]. 工程热物理学报,1997,18(4):479-483.
- [6] 王自荣,孙晓泉. 涂层热红外迷彩隐身的条件分析[J]. 激光与红外,2006,36(4):305-307.
- [7] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004,8:51.
- [8] 张天孙,卢改林. 传热学[M]. 第二版. 北京:中国电力出版社,2006,87,92.
- [9] 肖青,柳钦火,李小文,等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究[J]. 红外与毫米波学报,2003,22(5):373-378.
- [10] 余大斌,孙晓泉,王自荣,等. 阳光辐射对红外迷彩涂料效能的影响[J]. 隐身技术,2000,(3):43-46.
- [11] MIL-PRF-53134. Ultra lightweight camouflage net system (ULCANS)[S]. Military Standard of U. S. A.,1996:25.