

doi:10.3788/gzxb20154403.0304002

红外伪装涂料发射率的季节性要求

何梓健, 时家明, 汪家春, 袁忠才, 赵大鹏, 林志丹, 冯玥玥

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要: 为了研究伪装涂料 8~14 μm 波段的平均发射率在不同季节的取值范围, 结合太阳辐射, 植被温度以及气温的一日变化, 建立目标及单一植被背景在晴朗天气情况下不同季节的一日辐射温度变化模型. 以合肥地区为例, 分别以春分、夏至、秋分、冬至四个节气的日气候状况代表春夏秋冬四季的气候特征, 采集该地区在四个节气近五年的日值气候数据, 对覆盖不同发射率伪装涂料的目标以及植被背景在四个节气中从 6 时到 22 时的辐射温度变化进行模拟. 获得目标和植被背景的日辐射温度变化数据, 计算不同覆盖发射率值的伪装涂层时的目标和背景的欧氏距离和伪装效率. 利用欧氏距离和伪装效率对目标的伪装效果进行分析. 当欧氏距离最小时目标与植被背景红外特征最接近, 春夏秋冬欧氏距离最小的发射率值依次为 0.58、0.33、0.41、0.86; 以参考目标与背景的辐射温度差控制在 4K 以内为实现隐身的标准, 春夏秋冬伪装效率最高时的发射率值依次为 0.6、0.3、0.4、0.9.

关键词: 红外伪装; 发射率; 季节性; 数值分析

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0304002-6

Seasonal Requirement of the Infrared Camouflage Paint's Emissivity

HE Zi-jian, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun, YUAN Zhong-cai, ZHAO Da-peng,
LIN Zhi-dan, FENG Yue-yue

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: To analyse the seasonal requirement of camouflage paint's average emissivity in 8~14 μm waveband, after simulating the change of the solar radiation, the vegetative cover's temperature and the air temperature in one day, a temperature model of target and vegetative cover that display the changing of their radiation temperature in one day of different seasons was built. Hefei as an example, represent four seasons' climate by the weather conditions of spring equinox, summer solstice, autumnal equinox and winter solstice and collect Hefei's climate data of these solar terms in recent five years. Imitated the radiation temperature of target that covered the camouflage paint with different average emissivity in 8~14 μm waveband and vegetative cover from 6 to 22 in these solar terms. The Euclid Distance and the camouflage efficiency were obtained by the radiation temperature data to analyze the camouflage effect. When the Euclid Distance is least the infrared characteristic of target is closest to the vegetative cover's. In this condition, the emissivities in different seasons are 0.58, 0.33, 0.41 and 0.86. Radiation temperature difference between target and background within 4K is the standard to achieve stealth. Reference this standard, the target has the best camouflage efficiency in different seasons when the emissivities are 0.6, 0.3, 0.4 and 0.9.

Key words: Infrared camouflage; Emissivity; Seasonal; Numerical analysis

OCIS Codes: 040.3060; 130.3060; 260.3060

基金项目: “十二五”预研项目资助

第一作者: 何梓健(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外伪装技术. Email: hellozijian@gmail.com

导师(通讯作者): 时家明(1966-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光学技术应用. Email: sjmeei@yahoo.cn

收稿日期: 2014-07-31; 录用日期: 2014-09-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

目前的红外探测手段主要通过目标进行成像探测,而目标的温度和表面涂层的发射率是影响其红外成像特征的重要因素.影响目标温度的因素很多,包括目标热学特性,气候,季节以及具体时间等.而发射率对于目标而言相对固定,采用合适发射率值可以优化环境因素对目标温度变化的影响.因此,为了使目标在红外成像探测中实现较好的伪装效果,通常使用高中低不同发射率值的伪装涂料使目标实现红外迷彩分割,而中等发射率的值对高低两种发射率的取值具有一定的参考意义.对于战场上大部分的金属目标,在日夜环境中温度变化较大^[1],相对于背景物容易出现温度过高或过低的情况,并且一年四季气候条件差异明显,对伪装涂料的发射率提出了不同的要求.为此,根据各种气候条件选取合适的中等发射率值对提高目标的伪装时间和不同发射率的取值具有一定的参考价值.

电子工程学院的刘姜伟^[2]等通过对目标发射率的取值范围与目标真实温度的关系以及红外分割对不同斑块间发射率差值的要求进行了数值分析.王自荣^[3]等认为,发射率不一定越小越好,关键是要伪装目标的表现温度与背景相协调,才能获得较理想的红外伪装效率.海军工程大学的陈翮^[4]等建立温度模型并根据目标与背景的辐射对比度,对单一隐身涂料的发射率、短波和长波吸收率进行了优化设计,提高了目标的隐身效率.由于气象条件在一日中会有较大的变化,在单一气象条件下得出的发射率取值范围难以满足目标全天候伪装的要求.中国兵器工业第五十九所的冉洪武^[5]等总结了不同红外发射率隐身涂层在一日里与典型背景的融合程度,计算了各发射率涂层的伪装效率,对红外隐身涂层的发射率梯度设计提出了建议.面对全年季节变化,由于气象条件的不同,对发射率的取值有了不同的要求.

本文考虑不同季节的气象条件,分析目标中等发射率在不同季节的取值要求,建立目标和植被的温度计算模型,对覆盖伪装涂料的目标在一年中的春分、夏至、秋分、冬至四个节气中的一日温度变化进行模拟,分析目标表面发射率对目标辐射温度的影响,并针对四个节气中目标达到最高伪装效率时表面发射率的取值问题进行了分析研究.

1 地面目标温度模型的建立

地面目标的温度变化实质上是自身与环境之间进行能量交换的结果,其中主要的能量交换包括太阳和天空辐射、自身辐射以及与环境间的显热和潜热交换.事实上,目标在环境中的温度变化是一个复杂的能量

交换过程,除了物体表面的发射率和初始温度,还受周围空气的温度、湿度、大气条件等外界因素的影响,地面目标表面的热平衡方程为

$$\alpha_s Q_{\text{sun}} + \alpha_1 Q_{\text{sky}} - M_t + H_t + LE_t + G_t = 0 \quad (1)$$

式中 Q_{sun} , Q_{sky} 分别为太阳辐射和天空辐射; α_s , α_1 为地物的短波和长波吸收率; M_t 为地物的辐射出射度; H_t 为地物与环境的显热交换; LE_t 为地物与环境的潜热交换,由于本文主要针对干燥的地物表面,因此这一项为零; G_t 为热传导通量; 上述各项的值可分别由下列各式^[6]求出

1) 太阳辐射 Q_{sun}

$$Q_{\text{sun}} = Q_{\text{sd}} + Q_{\text{ss}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{sd}} = E_0 \cdot P_a^m \cdot \text{CCF} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$Q_{\text{ss}} = 0.5 \cdot E_0 \cdot \frac{1 - P_a^m}{1 - 1.4 \cdot \ln P_a} \cdot \text{CCF} \cdot \cos \theta \quad (4)$$

式中 Q_{sd} , Q_{ss} 分别为太阳直射辐射和散射辐射, θ 为太阳天顶角, E_0 为修正后的太阳常数,单位为 W/m^2 , P_a 为大气透明度, m ^[7] 为大气质量数, CCF 为天空云率, C 为云量,其数值范围 $0 \sim 10$,晴天云量 $0 \sim 3$,多云天气时 $4 \sim 7$,阴天时 $8 \sim 10$,以上各项可以由下面各式求出

$$E_0 = E_0^* \cdot \left[1 + 0.034 \cdot \cos \left(360 \cdot \frac{n}{365} \right) \right] \quad (5)$$

$$P_a = P_a^m \quad (6)$$

$$m = (1.002432 \cos^2 \theta + 0.148386 \cos \theta + 0.0096467) / (\cos^3 \theta + 0.149864 \cos^2 \theta + 0.0102963 \cos \theta + 0.000303978) \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi = \arccos(\sin \alpha \sin \delta + \cos \alpha \cos \delta \cos \omega) \quad (8)$$

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \gamma + 0.1149 \sin(2\gamma) - 0.1712 \sin(3\gamma) - 0.758 \cos \gamma + 0.3656 \cos(2\gamma) + 0.0201 \cos(3\gamma) \quad (9)$$

$$\gamma = 2\pi t / 365.2422 \quad (10)$$

$$t = n - 79.6764 - 0.2422(\text{年份} - 1985) - \text{INT}\left(\frac{\text{年份} - 1985}{4}\right) \quad (11)$$

$$\text{CCF} = \left(1 - \frac{C}{10} \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中 E_0^* 为修正前的太阳常数 $1367 \text{ W}/\text{m}^2$, n 为距离1月1日的天数, P_a 为一个大气质量下的大气透明度, p 和 p_0 分别是当地大气压和标准大气压, α 为观察者所处的地理纬度, δ 为太阳赤纬角, γ 为日角, ω 为太阳时角, INT 表示取整数部分.

在一个大气质量的条件下, P_a 有下面的经验值^[4]

表1 P_a 的经验值

Table 1 Empirical value of P_a

Weather regime	Best weather	Good weather	Medium fine	Overcast sky
P_a	0.85	0.80	0.65	0.53

2) 天空辐射 $Q_{\text{sky}}^{[8]}$

$$Q_{\text{sky}} = \sigma T_{\text{sky}}^4 = \sigma T_{\infty}^4 (0.61 + 0.05 \sqrt{e_a}) \quad (13)$$

$$e_a = \text{RH} \times 6.108 \exp\left(\frac{17.269(T_{\infty} - T_0)}{T_{\infty} - 35.86}\right) \quad (14)$$

3) 目标对外辐射

$$M_i = \epsilon_i \sigma T^4 \quad (15)$$

4) 显热交换

$$H_i = h(T_{\infty} - T) \quad (16)$$

式中 RH 为相对湿度; σ 为玻耳兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_i 为目标的长波发射率, $\epsilon_i = \alpha_i$; T 和 T_{∞} 分别为目标为环境的绝对温度, 单位为 K, $h^{[9]}$ 为传热系数, 可以由式(17)求出, 其中 v 为风速

$$h = 5.7 + 3.8v \quad (17)$$

2 目标表面温度的求解

本文对水平与地面的目标进行讨论. 由于垂直于目标表面方向上的温度梯度对目标表面的温度影响最大, 而水平方向上的温度梯度很小. 因此本文采用典型的一维瞬态导热模型模拟目标的温度变化, 即假定目标的热量交换只存在于垂直目标表面的方向, 如图 1 为目标结构图. 考虑到表面伪装涂层的比热小、厚度薄, 为了便于计算, 忽略其厚度, 仅考虑其发射率对目标温度的影响, 并认为目标底面绝热.

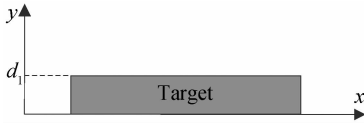


图 1 目标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of target

物体的温度场可以看作时间和厚度的函数, 目标的温度变化模型表示为

控制方程

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \quad (18)$$

上表面边界条件

$$-G_i = \lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial y} \right|_{y=d_1} \quad (19)$$

下表面边界条件

$$\lambda_m \left. \frac{\partial T_m}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (20)$$

初始条件

$$T_m(y, 0) = T_0 \quad (21)$$

式中 T_m 、 ρ_m 分别是目标的绝对温度和密度, λ_m 为目标的导热系数, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, c_m 为目标的比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, d_1 代表目标的厚度, 单位为 m, T_0 为初始温度.

3 植被地表的温度模型

为了对比目标与植被背景的温度差异, 建立植被地表的温度模型, 对于植被地表的能量交换可由热平衡方程表示, 即

$$e_s \cdot Q_{\text{sun}} + e_l \cdot Q_{\text{sky}} - M - H - \text{LE} = 0 \quad (22)$$

式中 e_s 和 e_l 分别为植被的短波和长波吸收率, M 为植被表面的辐射出射度, H 为植被层和大气的显热交换, LE 为植被层和大气的潜热交换, 分别^[10]为

$$M = e_l \sigma T^4 \quad (23)$$

$$H = C_p \rho_a \frac{T - T_{\infty}}{r_a} \quad (24)$$

$$\text{LE} = \frac{C_p \rho_a k_d (T - T_{\infty}) + D_a}{\Gamma} \quad (25)$$

$$r_a = \frac{1}{c_f v} \quad (26)$$

$$k_d = \frac{246.30.93}{(235 + T_{\infty})^2} \times 10^{7.45 T_{\infty} / (235 + T_{\infty})} \quad (27)$$

$$D_a = (1 - \text{RH}) \times 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{\infty}}{T_{\infty} + 273.3}\right) \quad (28)$$

式中 r_a 、 r_s 分别为植物边界层阻力和植被组分群体气孔阻力, 单位为 m/s, C_p 为空气定压比热, 单位为 $\text{KJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, ρ_a 为空气密度, 单位为 kg/m^3 , Γ 为干湿表常数, $\Gamma = 0.66 \text{ Pa} \cdot \text{C}^{-1}$, D_a 参考高度处空气温度 T_{∞} 时的比湿, k_d 为参考高度处空气温度 T_{∞} 的饱和比湿斜率; c_f 为植被热量与水汽无量纲传输系数.

4 环境气温变化模型的建立

为了模拟四季环境温度的变化模型, 以春分、夏至、秋分、冬至四个节气为代表, 采取正弦法^[11]对其一日温度变化进行模拟, 使用近五年来中国地面国际交换站气候资料日值数据集 (SURF_CLI_DAY_CES) 采集的合肥地区日最高温和最低温的温度数据, 如表 2.

表 2 合肥近 5 年温度数据

Table 2 Temperature data of Hefei in recent five years

	2009		2010		2011		2012		2013	
	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}
Spring	10.1 °C	19.2 °C	14.4 °C	24.1 °C	8.2 °C	12.7 °C	4.2 °C	11.2 °C	7.3 °C	15.0 °C
Summer	25.3 °C	34.9 °C	24.2 °C	31.3 °C	22.9 °C	26.2 °C	22.1 °C	32.0 °C	25.4 °C	28.5 °C
Autumn	19.4 °C	25.4 °C	14.7 °C	22.3 °C	14.7 °C	27.1 °C	19.1 °C	26.7 °C	25.3 °C	29.8 °C
Winter	-5.7 °C	6.3 °C	1.5 °C	16.4 °C	2.6 °C	8.0 °C	-9.0 °C	4.3 °C	-6.2 °C	5.5 °C

对表 2 中的历年温度数据进行平均,并利用正弦法,由式(29)、(30)得出合肥地区四个季节的温度模拟式(其中 ω 为太阳时角)

$$T_{\infty} = a \sin \omega + \beta \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad \beta = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (30)$$

春分:

$$T_{\infty} = 3.8 \sin \omega + 12.64 \quad (31)$$

夏至:

$$T_{\infty} = 3.3 \sin \omega + 27.28 \quad (32)$$

秋分:

$$T_{\infty} = 3.81 \sin \omega + 22.45 \quad (33)$$

冬至:

$$T_{\infty} = 5.73 \sin \omega + 2.37 \quad (34)$$

5 设定计算条件及物性参数

设定目标的厚度 d_1 为 0.010 m,导热系数 λ_m 为 $49.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,密度 ρ_m 为 7840 kg/m^3 ,比热容为 $465 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;植被的长波吸收率 e_l 为 0.95, $e_s = 0.80$ ^[12],植被组分群体气孔阻力 $r_s = 250 \text{ m/s}$,植被热

量与水汽无量纲传输系数 $c_f = 0.02$;计算太阳辐射,设定观察地区为合肥,纬度为北纬 31.52° ,天气条件设置为天空晴朗, $\text{CCF} = 0.8$, $P_1 = 0.65$,风速 $v = 1 \text{ m/s}$,相对湿度 $\text{RH} = 50\%$,取空气密度 $\rho_a = 1.13 \text{ kg/m}^3$,空气定压比热 $C_p = 1.013 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,时间为上午 6:00 至晚上 22:00.

6 计算分析

由于地面目标红外辐射的主要波段是 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,因此本文对目标在该波段的辐射温度进行分析,利用式(35)计算目标在该波段对应的辐射温度

$$\varepsilon_l \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda + (1 - \varepsilon_l) E_{\text{sky}} = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_r)} - 1} d\lambda \quad (35)$$

式中, $c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 \text{ (W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2)$, $c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)}$, E_{sky} 为天空的辐射照度, T 为目标真实温度, T_r 为目标辐射温度.

利用式(35)结合本文中建立的目标和植被背景温度模型得出目标与植被背景在春夏秋冬四季的辐射温度一日变化曲线如图 2

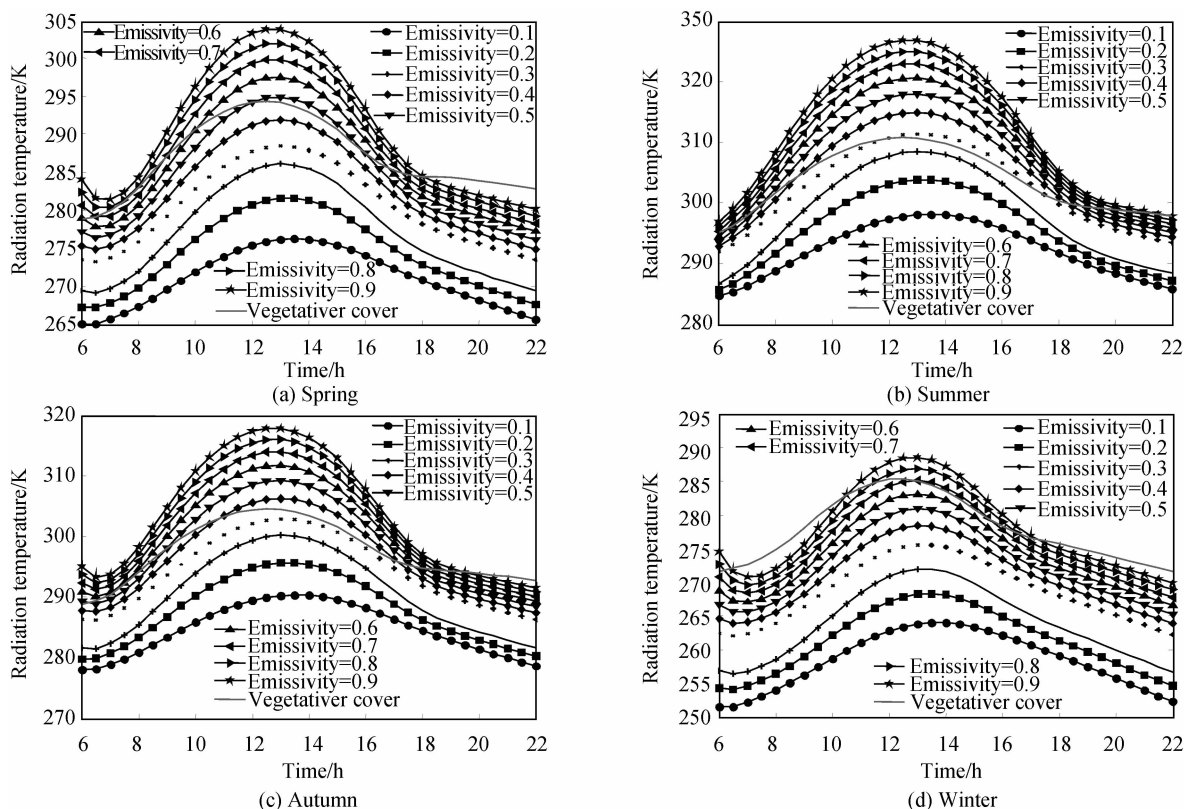


图 2 目标及植被背景辐射温度变化曲线

Fig. 2 The radiation temperature of target and vegetative cover

图 2 分别为不同季节覆盖不同发射率红外伪装涂料的目标在一日内的辐射温度变化趋势.可以看出:1)目标和背景的辐射温度整体趋势一致,随着时间先升高后降低,在中午时分辐射温度达到最高,且晚上目标

的辐射温度普遍比植被的要低;2)由于不同季节的气候条件不同,目标和植被背景的辐射温度也不同,在夏季目标和植被的辐射温度最高,春秋次之,冬季最低;3)目标的辐射温度随着涂料发射率的增大而增大,且

发射率越大温度变化越快,4)覆盖不同发射率伪装涂料的辐射温度与植被的辐射温度接近的程度不同,在不同的季节存在一个发射率值使目标和植被的辐射温度最为接近。

由于目标和植被背景辐射温度变化的趋势一致,为了表征目标和植被背景辐射温度的接近程度,引入欧氏距离 $d^{[13]}$ 作为评价参数, d 越小说明目标和背景的辐射温度越接近,通过计算覆盖不同发射率值伪装涂料的目标和植被辐射温度的欧氏距离,可以得出一个发射率值使两者之间的欧氏距离最小,即两者之间的辐射温度变化曲线最为接近。目标和植被辐射温度的欧氏距离为

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ri} - T_{bi})^2} \quad (36)$$

式中 T_{ri} , T_{bi} 分别表示目标和植被背景在不同时刻的辐射温度,式中 n 表示所取的时间点数量,本文选取的时间段为上午 6:00 至晚上 22:00,间隔为 30 min,因此 $n=33$ 。四个节气目标与植被背景的欧氏距离随表面发射率的变化曲线,如图 3。由图 3 可知,四个节气的欧氏距离曲线都存在一个最小值,且欧氏距离的最小值大小关系是冬至 < 夏至 < 秋分 < 春分。即表示存在一个发射率使目标和背景的辐射温度最为接近,且接近程度的大小关系是冬至 > 夏至 > 秋分 > 春分。经过计算,得到符合条件的欧氏距离的发射率值分别是春分为 0.58,夏至为 0.33,秋分为 0.41,冬至为 0.86。

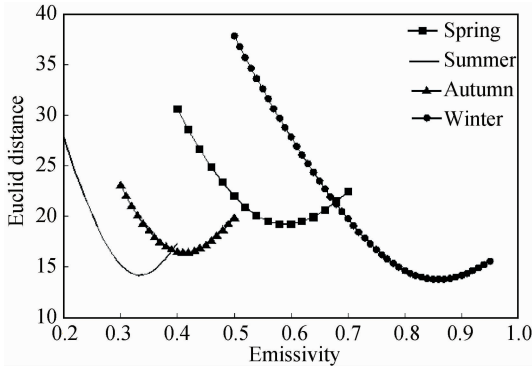


图 3 欧氏距离
Fig. 3 Euclid Distance

欧氏距离能表示目标和植被背景辐射温度的接近程度,伪装效率^[2]则是对目标红外隐身效果评估的一个重要的量化指标,其定义为在一定时间内伪装目标与背景的辐射温差小于一定温度差所占的时间百分比,目前普遍认可目标与背景的辐射温度差控制在 4K 以内即可实现隐身,因此伪装效率表示为

$$\eta = \frac{\{\Delta T_r | \Delta T_r \leq 4K\}}{N} \times 100\% \quad (37)$$

式中 ΔT_r 为目标与植被的辐射温差, N 为温度的取样数,本文以 3 min 为间隔,选取的时间段为上午 6:00 至晚上 22:00,故取样 1 601 个,发射率间隔 0.1。经过

计算得出四个节气覆盖不同发射率值伪装涂料的目标的伪装效率,如图 4

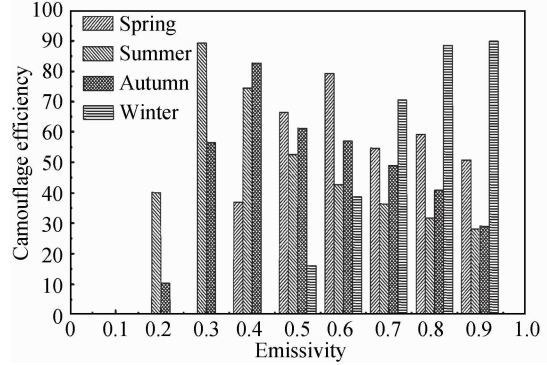


图 4 伪装效率对比图
Fig. 4 Camouflage Efficiency

由图 4 可知,同一发射率值在不同季节中的伪装效率并不一样,难以实现整年的伪装要求。对于讨论的四个节气,经过计算,伪装效率最高时发射率取值分别为 0.6、0.3、0.4、0.9,达到 79.26%、82.64%、89.82%。观察伪装效率随发射率值的变化趋势,在夏至,气候炎热,伪装效率随着发射率的增大而减小;在冬至,则呈现相反的趋势,较大的发射率值则取得较高的伪装效率。主要原因是植被背景比伪装目标具有更好的控温能力,导致植被背景的红外特征随环境气候变化小于伪装目标,因此为了保证目标具有较高的伪装效率,伪装涂料的发射率取值应该根据气候条件作适当调整。

8 结论

通过建立目标及单一植被背景在不同季节晴天条件下的一日辐射温度变化模型,分别对目标和背景的辐射温度进行了计算分析,结果表明:

- 1) 目标与植被背景的辐射温度整体趋势一致,且目标的辐射温度随着涂料发射率的增大而增大,发射率越大温度变化越快,在晚上时目标的辐射温度普遍比植被低;
- 2) 由于不同季节的气候条件不同,目标和植被背景的辐射温度也表现不同,在夏季目标和植被的辐射温度最高,春秋次之,冬季最低;
- 3) 覆盖不同发射率伪装涂料的辐射温度与植被的辐射温度接近的程度不同,在不同的季节存在一个发射率值使目标和植被的辐射温度最为接近;
- 4) 在一年四个节气中,发射率取值在 0.58、0.33、0.41、0.86 时目标和植被背景辐射温度间的欧氏距离最小,两者辐射温度最接近,接近程度的大小关系是冬至 > 夏至 > 秋分 > 春分;
- 5) 在春夏秋冬四个节气的发射率取值为 0.6、0.3、0.4、0.9 可以使目标的伪装效率分别达到 79.26%、

89.25%、82.64%、89.82%。

由于本文采用的模型均是在前人所建立的模型基础上进行了整合,暂时缺乏对结果的实验验证,并且实际天气状况变化莫测,模型并不能完全模拟。因此本文的仿真具有一定的局限性,以上结论对在各个季节的红外伪装涂料的中发射率取值范围提供一定的参考,并需设计相应的高低两种发射率值的伪装涂料与之配合,但不作为发射率取值的唯一选择标准。

参考文献

- [1] 张兴祥. 相变材料胶囊制备与应用[M],北京:化学工业出版社,2009.
- [2] LIU Jiang-wei. Numerical analysis of requirement of emissivity for infrared pattern painting camouflage[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2):442-445.
刘姜伟. 红外迷彩伪装对发射率要求的数值分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(2):442-445.
- [3] WANG Zi-rong, SUN Xiao-quan. Study on thermal image of infrared camouflage coating[J]. *Surface Technology*, 2004, **33**(6):65-66.
王自荣,孙晓泉. 红外隐身涂层的热图研究[J]. *表面技术*, 2004, **33**(6):65-66.
- [4] CHEN Xuan, YANG Li. Optimization and evaluation of stealth performance of coatings based on radiance contrast[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6):1043-1047.
陈翮,杨立. 基于辐射对比度的涂料隐身性能优化与评估[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(6):1043-1047.
- [5] RAN Hong-wu. Research on camouflage efficiency of stealth coatings with different emissivity at typical background[J]. *Surface Technology*, 2009, **38**(5):63-66.
冉洪武. 不同发射率红外隐身涂层在典型背景中的伪装效率研究[J]. *表面技术*, 2009, **38**(5):63-66.
- [6] WANG Chang-sheng. The study of surface temperature characteristics of the typical objects[D]. Dalian Maritime.
王长胜. 典型地物表面温度特性研究[D]. 大连海事大学, 2013.
- [7] WANG Shi-xi, ZHU Shi-hao. The study on measuring the atmospheric optical depth using a spectroradiometer[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(3):326-331.
王世喜,朱永豪. 用光谱辐射计测量大气光学厚度的研究[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(3):326-331.
- [8] 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年.
- [9] 葛新石,龚堡,陆维德,等. 太阳能工程-原理和应用[M]. 北京:学术期刊出版社,1988.
- [10] SHAO Xiao-peng. Research on infrared texture synthesis[D]. Xidian University, 2005.
邵晓鹏. 红外纹理生成方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2005年.
- [11] JIANG Hui-fei, WEN De-yong, DING Yi, et al. A new simulation method for the diurnal variation of temperature-Sub-Sine Simulation[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2010, **33**(3):61:65.
姜会飞,温德永,李楠,等. 利用正弦分段法模拟气温日变化[J]. *气象与减灾研究*, 2010, **33**(3):61:65.
- [12] YANG De-gui, LI Xiang, ZHUANG Zhao-wen. Comparative studies of IR radiation characteristics of typical ground based on a uniform model[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(4):263-266.
杨德贵,黎湘,庄钊文. 基于统一模型的典型地表红外辐射特性对比研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(4):263-266.
- [13] 吴国富,安万富,刘景海. 实用数据分析方法[M]. 北京:中国统计出版社,1992年.