

文章编号: 1001-5078 (2006) 04-0305-03

涂层热红外迷彩隐身的条件分析

王自荣, 孙晓泉

(解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:对于 8 ~ 14 μm 波段的热红外隐身, 以 4K 辐射温差为标准, 推导和计算了目标与背景上表面平均发射率的最大差值范围 $\Delta\epsilon_s$ 以及目标上表面相邻斑块间发射率的最小差值范围 $\Delta\epsilon_{d2}$, 并探讨了影响 $\Delta\epsilon_s$ 和 $\Delta\epsilon_{d2}$ 的因素。

关键词:热红外隐身; 迷彩隐身; 隐身条件; 辐射温差; 发射率

中图分类号: TN976 **文献标识码:** A

Thermal Camouflage Condition of Infrared Pattern Paint

WANG Zi-rong, SUN Xiao-quan

(Electronic Engineering Institute of P. L. A., Hefei 230037, China)

Abstract: Based on the criterion of 4K radiation temperature difference, this paper inferred and calculated thermal camouflage condition of infrared pattern paint for the 8 ~ 14 μm waveband thermal camouflage, including the emissivity difference range of upper surface of target and background $\Delta\epsilon_s$, and the emissivity difference range of spots adjacent to each other on top surface of target $\Delta\epsilon_{d2}$. The paper also discussed the factors influencing $\Delta\epsilon_s$ and $\Delta\epsilon_{d2}$.

Key words: thermal infrared camouflage; pattern paint camouflage; camouflage condition; emissivity difference; radiativity

1 引言

利用红外迷彩涂层实现红外隐身是地面目标红外隐身的重要手段。这需要解决两个问题: 一是目标相邻迷彩斑块的发射率关系; 二是目标迷彩涂层的平均发射率与背景发射率的关系。要实现目标的热红外迷彩隐身, 必须满足这样两个基本条件: 一是目标相邻迷彩斑块的发射率的差值在一定范围之外; 二是目标迷彩涂层涂层的平均发射率与背景发射率的差值在一定范围之内。关于这个发射率差值范围的确定, 由于热成像系统探测到的是目标与背景或目标迷彩斑块之间的辐射温差, 可以从这个角度来推导。

2 目标平均发射率与背景平均发射率的关系

假定目标与背景的实际温度分别为 T_t 和 T_s , 目标与背景的辐射温度分别为 T_{te} 和 T_{se} , 目标与背景的平均发射率分别为 ϵ_t 和 ϵ_s 。由于目标除了自身的热红外辐射以外, 还反射天空背景的红外辐射 (通常对目标的上表面) 或目标周围背景的红外辐射 (通常对目标的侧面), 因此目标的有效辐射出射

度 M_t 应包括两部分, 这里只考虑反射天空背景红外辐射的情况, M_t 如公式 (1) 所示:

$$M_t = \epsilon_t \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_t) E_{sky} \quad (1)$$

式中, $C_1 = 3.741774 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, 为第一辐射常数; $C_2 = 1.4387869 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, 为第二辐射常数; T 为温度; λ 为波长; E_{sky} 为天空背景对地面目标的辐照度, $E_{sky} = \pi L_{sky}$, L_{sky} 为天空背景的辐射亮度。

同样, 目标附近的背景除了自身的热辐射以外, 也反射天空背景的热红外辐射, 因此背景的有效辐射出射度 M_s 如 (2) 所示:

$$M_s = \epsilon_s \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_s) E_{sky} \quad (2)$$

8 ~ 14 μm 波段的热红外黑体辐射的表达式如公式 (3) 所示:

作者简介: 王自荣 (1969 -), 男, 博士, 从事光电功能材料研究。
E-mail: wzreei@126.com
收稿日期: 2006-0-

$$M_b = \int_0^{14} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_e}} - 1} d\lambda \tag{3}$$

根据公式 (1)、(2)和 (3)可以分别求出目标的黑体等效辐射温度 (后面简称辐射温度) T_{te} 和背景的辐射温度 T_{se} ,进而可以求出目标和背景的辐射温差 ΔT_e 为:

$$\Delta T_e = |T_{te} - T_{se}| \tag{4}$$

要使目标隐身于背景之中,必须使目标和背景的辐射温差 ΔT_e 小于热成像系统的最小可分辨温度 MRID,由于 MRID通常是在判读等级为识别、正确判读概率为 90%、条纹长宽比为 7 1时的实验室条件下获得的,因此目标和背景的辐射温差必须是小于经过校正了的最小可分辨温度 $\frac{1}{\tau}$ MRID^[4],即:

$$\Delta T_e < \frac{1}{\tau} \text{MRID}'' \tag{5}$$

式中, τ 为热红外辐射的大气透过率,MRID可用公式 (6)表示:

$$\text{MRID}'' = K \sqrt{\frac{\tau}{\xi}} \text{MRID}(f_r) \tag{6}$$

式中, ξ 为目标等效图案的长宽比, $\xi = 2n_e \cdot m$, n_e 为不同判读等级下的等效条带数, m 为实际目标的长宽比;MRID是空间频率的函数,写成 $\text{MRID}(f_r)$,其中 $f_r = \frac{n_e R}{D}$ (周/毫弧度), R 为热像仪与目标之间的距离, D 为目标的有效尺寸; K 为具体要求的识别概率下极限视在信号比与 90%的识别概率下的极限视在信号比的比值,当识别概率为 90%时, K 取 1,当识别概率为 80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%时, K 分别取为 0.85、0.72、0.65、0.58、0.53、0.47、0.39、0.29^[2]。

由于目前普遍认为,只要目标与背景的辐射温差控制在 4K以内,既可以实现红外隐身^[3],因此这里不去详细考虑 MRID的校正问题,只分析如何控制目标的发射率使目标与背景的辐射温差控制在 4K以内。

假定目标与背景的实际温度相同 $T_t = T_s$,背景发射率为 0.8,天空背景辐射亮度为 $17\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1[4]}$,可以计算出,不同温度条件下,可以允许的目标与背景的最大发射率差值 $\Delta \epsilon_s$,如表 1所示。

在表 1中,目标与背景的发射率差值必须小于表中所列出的数值,才能够保证目标与背景的表面辐射温差小于 4K。例如,在 300K时,如果背景的发射率为 0.80,那么,目标表面的平均发射率就必须

保持在 0.7177 ~ 0.8823 之间,才能保证目标的隐身。由表 1可以看出,随着温度的升高, $\Delta \epsilon_s$ 是逐渐降低的。

表 1 不同温度下目标隐身于背景中目标与背景发射率差值的最大值

温度	270K	280K	290K	300K	310K	320K	330K	340K	350K
$\Delta \epsilon_s$	0.1459	0.1148	0.0957	0.0823	0.0726	0.0651	0.0591	0.0542	0.0501

事实上,目标的温度通常高于背景的温度,因此,可以允许目标的发射率较低。假定目标比背景的实际温度高 5K,即 $T_t = T_s + 5$,背景发射率仍取 0.8,天空背景辐射亮度为 $17\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,不同背景温度条件下,可以允许的目标与背景的最大发射率差值 $\Delta \epsilon_s$ 的计算结果如表 2所示。

表 2 不同温度下目标隐身于背景中目标与背景发射率差值的最大值

温度	270K	280K	290K	300K	310K	320K	330K	340K	350K
$\Delta \epsilon_s$	0.2469	0.2026	0.1733	0.1524	0.1363	0.1237	0.1134	0.1048	0.0975

由表 2可以看出,当目标比背景的实际温度高 5K时,目标平均发射率比背景发射率低的范围放宽了。

以上推导的是目标与背景平均发射率的取值范围。由于背景的热红外辐射并不是像假设的那样是均匀的辐射,这时如果目标的热红外辐射是均匀辐射,就很容易在热成像系统上分辨出目标的轮廓来,探测到目标。因此除了保证目标与背景的辐射温差控制在一定范围以内之外,还要考虑目标的斑块分割效果,即红外迷彩隐身斑块间的辐射温差应控制在一定范围以外,使其在红外热图上仍具有分割效果。

3 目标相邻迷彩斑块的发射率关系

假定目标任意相邻的两个迷彩斑块的 actual 温度分别为 T_{t1} 和 T_{t2} ,两个斑块的等效黑体辐射温度分别为 T_{te1} 和 T_{te2} ,两个斑块的发射率分别为 ϵ_{t1} 和 ϵ_{t2} ,则两个斑块的有效辐射出射度 M_{t1} 和 M_{t2} 分别为:

$$M_{t1} = \epsilon_{t1} \int_0^{14} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_{t1}}} - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_{t1}) E_{sky} \tag{7}$$

$$M_{t2} = \epsilon_{t2} \int_0^{14} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T_{t2}}} - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_{t2}) E_{sky} \tag{8}$$

根据公式 (7)和 (8)以及黑体辐射的辐射出射度表达式 (3),可以分别求出两个斑块的辐射温度 T_{te1} 和 T_{te2} ,进而可以求出目标相邻斑块的辐射温度 ΔT_{te12} 为:

$$\Delta T_{te12} = |T_{te1} - T_{te2}| \tag{9}$$

要使目标相邻的两个迷彩斑块在红外热图像上可以分辨,必须使两个斑块的辐射温差 ΔT_{el2} 大于热成像系统的经过修正的最小可分辨温差,即:

$$\Delta T_{el2} \geq \frac{1}{T} MRID \left(\tau_{fr} \right) \tag{10}$$

仍以 4K 作为校正的最小可分辨温差,即两个相邻斑块的辐射温度必须不小于 4K,才能保证两个斑块在热图上有明显的分割,以便分析斑块间发射率的关系。

假定两个斑块温度相同,背景发射率为 0.8, $\varepsilon_d > \varepsilon_2$, $\varepsilon_d = \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_{d2}$; 天空背景辐射亮度为 $17 W m^{-2} sr^{-1}$, 根据 (7)、(8) 和 (9) 式可以计算出不同温度条件下,两斑块间的发射率关系数据,如表 3 所示。

表 3 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 随温度和固定斑块发射率的变化关系 ($\varepsilon_s = 0.8$)

ε_d T	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
270K	0.1250	0.1305	0.1356	0.1408	0.1459	0.1508
280K	0.0952	0.1004	0.1054	0.1102	0.1148	0.1193
290K	0.0780	0.0820	0.0864	0.0912	0.0957	0.100
300K	0.0650	0.0698	0.0742	0.0784	0.0823	0.0863
310K	0.0563	0.0607	0.0649	0.0689	0.0726	0.0762
320K	0.0498	0.0540	0.0579	0.0616	0.0651	0.0685
330K	0.0447	0.0487	0.0524	0.0558	0.0591	0.0622
340K	0.0406	0.0444	0.0479	0.0511	0.0542	0.0571
350K	0.0373	0.0408	0.0441	0.0472	0.0501	0.0528

根据表 3 可以做出 290K、300K、310K 时 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 随固定斑块发射率的变化关系,如图 1 所示。

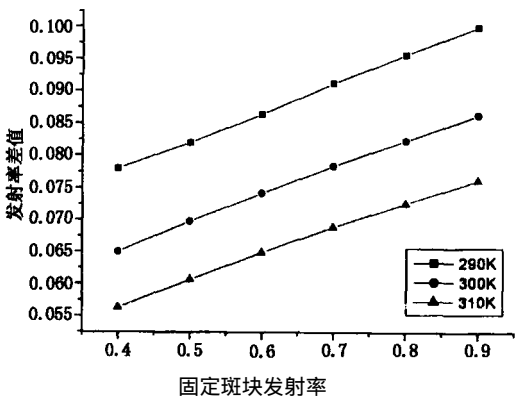


图 1 不同温度下 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 随固定斑块发射率的变化关系

由表 3 和图 1 可以看出,相邻斑块间的发射率差值既与固定斑块发射率有关,又与目标的温度有关。在目标温度相同且固定时,固定斑块发射率越小,相邻斑块间所需的发射率差值越小,固定斑块发射率越大,相邻斑块间所需的发射率差值越大。例如,在 300K 时,如果某一斑块发射率为 0.9,则相邻斑块的发射率应不大于 $0.9 - 0.0863 = 0.8137$,才

能保证两斑块间的辐射温差大于 4K,这时 $\Delta \varepsilon_{d2} = 0.0863$;如果某一斑块发射率为 0.7,则相邻斑块的发射率应不大于 $0.7 - 0.0784 = 0.6216$,才能保证两斑块间的辐射温差大于 4K,这时 $\Delta \varepsilon_{d2} = 0.0784$,发射率差值 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 变小了。

由表 3 和图 1 还可以看出,在背景发射率相同、目标某一迷彩斑块发射率固定不变的情况下,随着温度的升高,相邻斑块间所需的发射率差值 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 逐渐减小。

假定目标温度为 $T_t = 300 K$,背景温度为 $T_s = 300 K$,背景平均发射率为 0.8,目标表面斑块最大发射率为 0.9300,如果将目标表面涂敷成四色红外迷彩,可以计算出,四种斑块的发射率应该依次为 $\varepsilon_d = 0.9300$, $\varepsilon_2 = 0.8459$, $\varepsilon_3 = 0.7649$, $\varepsilon_4 = 0.6872$,相应的斑块发射率最小差值依次减小,分别为 0.0841、0.0810、0.0777。假定目标表面四种斑块面积相等,则其平均发射率为 ε_d 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 的算术平均值,即 $\varepsilon_t = 0.8070$,与背景发射率差值 $\Delta \varepsilon_s = 0.007$,满足目标隐身于背景中的要求。

4 小 结

由以上分析可以看出,通过热图迷彩实现目标红外隐身,既需要目标表面的平均发射率与背景的平均发射率的差值 $\Delta \varepsilon_s$ 在一定范围之内,又需要目标相邻斑块间的发射率的差值 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 在一定范围之外,但这种发射率的差值并不是固定不变的,它与背景发射率、目标与背景的温度、斑块的发射率都有关系,具有如下规律:

- (1) 目标与背景的发射率差值 $\Delta \varepsilon_s$ 与实际温度有关,在目标与背景温度相同的条件下,温度越高, $\Delta \varepsilon_s$ 越小;温度越低, $\Delta \varepsilon_s$ 越大;当目标温度比背景温度高时, $\Delta \varepsilon_s$ 的范围可以适当增大;
- (2) 目标相邻斑块间的发射率的差值 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 与实际温度有关,在目标相邻斑块温度相同的条件下,温度越高, $\Delta \varepsilon_{d2}$ 越小;温度越低, $\Delta \varepsilon_{d2}$ 越大;
- (3) 目标相邻斑块间的发射率的差值 $\Delta \varepsilon_{d2}$ 与固定斑块发射率有关,固定斑块发射率越小, $\Delta \varepsilon_{d2}$ 越小;固定斑块发射率越大, $\Delta \varepsilon_{d2}$ 越大。

参考文献:

[1] 周刚,王平军. 红外成像系统的探测概率与目标隐身 [J]. 航天电子对抗, 1997, (3): 54 - 58

[2] 刘景生. 红外物理 [M]. 北京:兵器工业出版社, 1992

[3] 伪装教研室编. 伪装原理 [M]. 工程兵工程学院, 1995

[4] George J Zissis Source of Radiation [M]. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, 1999