

文章编号: 1672-8785(2013)07-0034-05

基于辐射对比度的变发射率 舰船的红外隐身研究

夏 舸 杨 立

(海军工程大学动力工程学院热工教研室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 利用固定发射率的红外隐身涂料无法实现全天候舰船红外隐身。以小于 0.04 的目标与背景的辐射对比度作为红外隐身的评判标准, 通过计算分析目标与背景的红外特征模型, 得到了实现红外隐身所需的目标表面发射率变化范围, 提出利用电致变色材料来改变目标表面的平均发射率。与固定发射率的普通红外隐身涂料相比, 改变发射率后的红外隐身涂料的隐身效率有了很大的改善, 基本能满足目标的全天候红外隐身要求。

关键词: 海上目标; 红外特征; 辐射对比度; 平均发射率; 电致变色

中图分类号: TN211 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.07.08

Study of Infrared Stealth of Ships with Variable Emissivity Based on Radiation Contrast

XIA Ge, YANG Li

(Academy of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: It is impossible to implement all-weather infrared stealth of a ship by using a coating with a changeless emissivity. Taking the radiation contrast less than 0.04 of a target and the background as a judgment criteria, the variation range of the target surface emissivity required for infrared stealthy is obtained by calculating and analyzing the infrared characteristic models of the target and background. A method for changing the average surface emissivity of a target by using electrochromic materials is proposed. Compared with the common infrared stealthy coating with a fixed emissivity, the stealthy efficiency of the infrared stealthy coating with a changed emissivity is improved greatly. It can meet the all-weather infrared stealth requirement of a target basically.

Key words: sea target; infrared characteristic; radiation contrast; average emissivity; electrochromic

0 引言

随着红外探测技术和红外成像制导技术的飞速发展和不断成熟, 海面军事目标面临着越来越多的光电威胁, 对目标红外隐身技术的研究就显得日益迫切。因此, 各国都加大了对红外

隐身技术的研究力度。采用红外隐身材料是目前目标红外隐身的主要手段之一。近几年, 一系列新型隐身材料已经研制成功, 并已应用于实战^[1,2]。TNO 物理与电子实验室的 P.Jacobs 博士使用的灰色红外低发射漆的发射率为 0.5:0.6^[3]。在白天和晚上的表观温度测量中, 与未涂装的

收稿日期: 2013-04-22

作者简介: 夏舸(1989-), 男, 江苏东台人, 硕士研究生, 主要从事舰船红外隐身方面的研究。

E-mail: 734872225@qq.com

目标相比, 涂该漆能大大缩小目标与环境的红外差别。西德专利 DE3606691A1 报道的金属涂料的红外反射率高达 0.9, 红外发射率为 0.1^[4]。陈皿等研究了红外隐身涂料的优化与评估方法, 对涂料的发射率、短波和长波吸收率进行了优化设计, 有效地提高了目标的隐身效率^[5]。

但是, 目前的红外隐身涂料通常只有固定的表面发射率, 具有一定的局限性。在一天的不同时刻, 太阳、海面和天空等对目标表面辐射的能量会随时间的变化而变化。当目标与背景的温差变化剧烈时, 普通隐身涂料无法达到实时红外隐身的目的。针对这一情况, 本文从目标的红外隐身机理出发, 以目标与背景的辐射对比度作为红外隐身的评估指标, 对目标的表面平均发射率的控制规律进行研究。

1 目标表面温度的模拟

目标的表面温度是目标红外特征的直接体现。因此, 对目标表面温度场的研究是研究红外隐身技术的基础。海上目标所处的环境复杂多变, 涉及到热传导、热对流和热辐射三种基本热量传递方式, 太阳辐射及海天背景辐射都会影响海上目标表面的温度场。

由于海上目标所处的环境复杂, 我们作出以下假设, 以简化计算模型:

- (1) 由于舰船壁的长宽尺寸远远大于厚度尺寸, 三维导热问题可简化为一维问题;
- (2) 假设舰船内部温度恒定;
- (3) 假设海上目标的热物性参数不变且目标内部不含热源。

根据以上假设, 目标的导热微分方程为^[6]

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, $T(x, t)$ 为目标上位置处在 t 时刻的热力学温度, 单位为 K; a 为目标材料的热扩散率, 单位为 m^2/s 。对于海面目标与背景的红外特征模型, 在不考虑外表面潜热影响的情况下, 外表面的热边界条件为

$$\lambda \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_s \times CCF \times (I_n + I_d + I_r)$$

$$+ \alpha_l \times (I_{sky} + I_g) - \varepsilon \sigma T^4 + h_{out}(T_a - T) \quad (2)$$

内表面的热边界条件为

$$-\lambda \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=l} = h_{in}(T_{win} - T_{fin}) \quad (3)$$

式中, α_s 、 α_l 、 ε 分别为目标表面材料的短波吸收率、长波吸收率与平均发射率; I_n 、 I_d 、 I_r 分别为太阳辐射、天空散射辐射和海面反射辐射; I_{sky} 、 I_g 分别为天空辐射和海水辐射; CCF 为云遮系数; T 和 T_a 分别为目标表面的温度和大气温度; T_{win} 和 T_{fin} 分别为内壁面的温度和室内气温; h_{in} 和 h_{out} 分别为内外表面的对流换热系数。

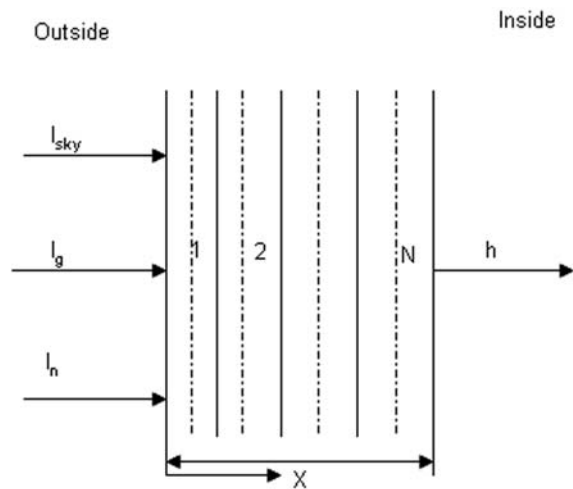


图1 简化模型

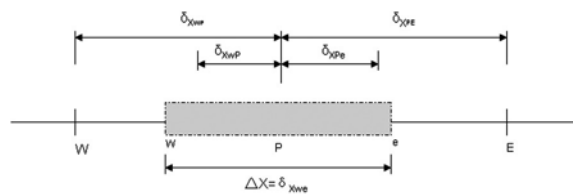


图2 网格定义尺寸

我们将舰船壁沿厚度方向分为 N 层, 每层间隔处为一节点。加上内外表面上各一节点, 共有 $N+1$ 个节点。两虚线间为一单元 (图 1), 采用有限体法对 $N+1$ 个节点方程进行离散。

任意取一个中间节点 P , 其所代表的控制容积尺寸定义如图 2 所示。 P 点的西侧相邻节点为 W , 东侧相邻节点为 E 。 W 点到 P 点的距离定义为 δ_{xWP} , P 点到 E 点的距离定义为

δx_{PE} ; P 点所在控制容积的西侧边界为 w, 东侧边界为 e, 控制体积为 δx_{we} 。离散后, 舰船壁瞬态热传导问题的离散方程 (全隐格式) 可表示为

$$a_P T_P = a_W T_W + a_E T_E + a_P^0 T_P^0 + S_u \quad (4)$$

式中

$$a_W = \frac{\lambda_w}{\delta x_{WP}} A_w \quad a_E = \frac{\lambda_e}{\delta x_{PE}} A_e$$

$$a_P = a_W + a_E + a_P^0 - S_p \quad a_P^0 = \rho c \frac{\Delta x_{we}}{\Delta t}$$

Δt 为时间步长, ρ 、 c 分别为舰船壁的密度和比热容。

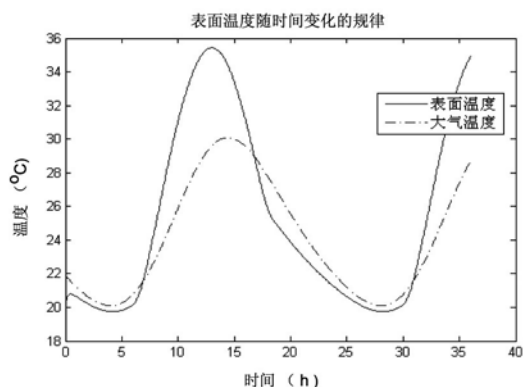


图 3 目标的表面温度与大气温度

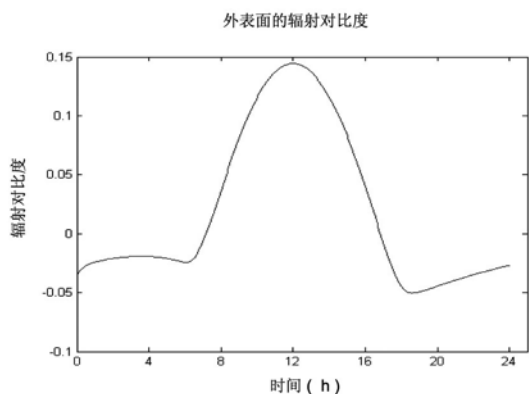


图 4 普通油漆表面的辐射对比度与时间的关系

假定舰船壁面的厚度为 8 mm, 发射率为 0.95, 导热系数 λ 为 14.9 W/(m·K), 密度 ρ 为 7900 kg/m³, 气温在 20~30°C 变化, 湿度为 80%, 风速为 8 m/s, 舰船外部和内部的对流换热系数 h_{out} 和 h_{in} 分别为 25 W/(m²·K) 和 10 W/(m²·K)。

经计算, 舰船表面瞬时温度和外表面辐射对比度的模拟结果如图 3 和图 4 所示。

图 3 表明, 目标的表面温度在早晨以及深夜的变化比较小, 而且变化均匀。白天由于受到太阳辐射的影响, 目标表面的温度波动比较大, 最高可达 35 °C, 最低只有 19 °C; 而大气的温度变化相对比较均匀, 波动范围比较小。图 4 所示为只涂普通油漆的舰船外表面全天的辐射对比度。由图可以看出, 假如没有使用隐身涂料, 舰船大部分时间的辐射对比度都高于 0.04, 最高的时候可达 0.15。所以, 普通油漆涂层不能满足红外隐身的要求。

2 实时隐身的表面发射率变化范围

目前, 在军事上都是通过用红外探测系统探测目标与背景能量的差别来发现目标的。因此, 我们通过引入辐射对比度这个参数来描述这种差别^[7]。当这种差别小于 0.04 时, 可以认为红外探测系统无法探测到此目标, 即目标达到了隐身状态^[8]。

$$C = \frac{M_T - M_B}{M_B} \quad (5)$$

式中, M_T 、 M_B 分别为目标与背景的辐射出度。

$$M_T = \varepsilon_T \sigma T_T^4 + (1 - \varepsilon_T) H_e \quad (6)$$

$$M_B = \varepsilon_B \sigma T_B^4 + (1 - \varepsilon_B) H_e \quad (7)$$

式中, ε_T 、 ε_B 分别表示目标与背景的发射率; T_T 、 T_B 分别表示目标与背景的温度; H_e 为环境辐照度。将式 (5)、(6) 代入式 (4) 中, 得

$$C = \frac{\varepsilon_T \sigma T_T^4 - \varepsilon_B \sigma T_B^4 - (\varepsilon_T - \varepsilon_B) H_e}{\varepsilon_B (\sigma T_B^4 - H_e) + H_e} \quad (8)$$

式中, 当目标材料的物性参数与外界环境参数一定时, 可以认为目标的外表面温度 T_T 是 ε_T 的函数。 H_e 是海面、天空和太阳辐射的综合结果, 是一个与时间有关的参数; 而背景温度 T_B 与太阳辐射、环境温度和风速有关, 也是一个与时间有关的参数, 可以通过经验公式获得^[9], 但装有红外探测器的红外制导武器主要观测的是舰船的舷侧部位, 此时目标对应的背景为天空, 因此可将大气的温度近似看成背景温度; 背景的

发射率取一个定值常数 0.9。这样, 在某一固定时刻, 目标表面与背景的辐射对比度仅是一个与目标表面发射率有关的参数。

假定辐射对比度满足 $|C| \leq 0.04$, 我们可以认为红外热像仪探测不到目标。通过编程对不等式进行求解, 可以获取红外隐身要求的目标表面平均发射率的变化范围, 如图 5 所示。

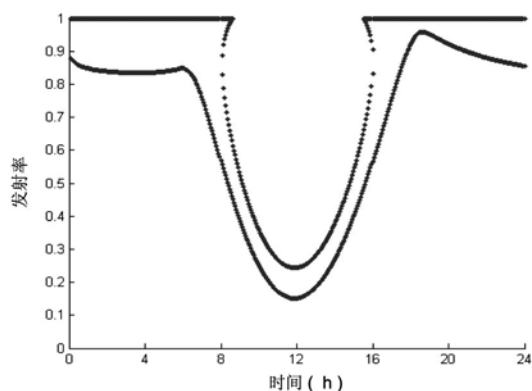


图 5 隐身所需的目标表面发射率与时间的关系

由图 5 可以看出, 在正午时实现红外隐身所需要的目标表面发射率最小, 在 0.15~0.25 之间, 这是由于在正午的时候目标的表面温度比较高, 降低发射率可以降低目标的辐射出射度, 从而降低目标与背景的差别。而在夜晚, 实现红外隐身所需的发射率范围为 0.8~1。因此, 一天中所有时刻实现红外隐身所需的发射率的变化范围比较大, 在 0.14~1 之间。这就对发射率的控制提出了严格的要求。通过对所需发射率的分析可以看出, 所需发射率的变化趋势大体上与温度的变化趋势相反。

3 可变发射率材料的隐身效率

由上面的分析计算可知, 控制目标表面发射率的变化是红外隐身的一种好方法。可变发射率材料是实现控制目标发射率的核心, 目前主要有热致变色材料和电致变色材料两种^[10]。考虑到控制的方便性, 我们选取电致变色材料对目标表面发射率进行控制。

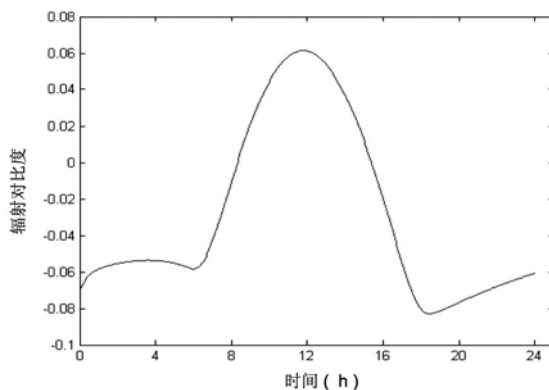


图 6 使用普通隐身涂料时辐射对比度与时间的关系

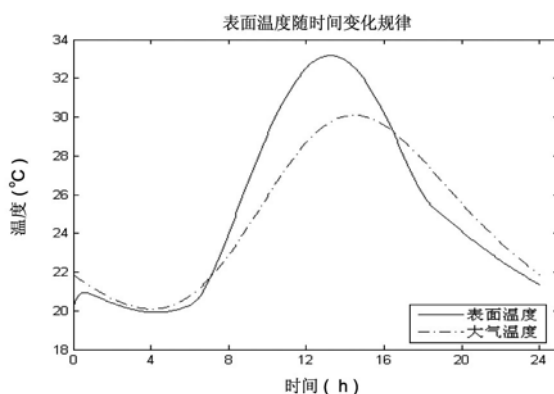


图 7 使用普通隐身涂料时温度与时间的关系

电致变色材料在外加电场的作用下其价态和化学组分会发生可逆的变化, 因而可改变材料的发射率。目前电致变色材料可以控制红外发射率在 0.23~0.89 之间变化, 变色时间在 2 s 以内, 变色循环次数在 10^5 以上, 使用温度范围为 $-95^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ ^[11]。

图 6 和图 8 分别表示了采用普通隐身涂料和电致变色材料时目标的辐射对比度与时间的关系。从图 6 中可以看出, 目标的表面辐射对比度比普通油漆面的辐射对比度降低了很多, 但仍有超过半天的时间不能满足 $|C| \leq 0.04$ 的隐身要求, 也就是说一天之中有一半时间目标在敌人的探测器的监视中。由图 8 可知, 利用电致变色材料后, 辐射对比度降低了很多, 只有在傍晚的一小段时间内目标有暴露的危险, 其他时间都能达到隐身的要求, 最高的辐射对比度的绝对值不到 0.05。图 7 和图 9 分别表示了采用普通

隐身涂料和电致变色材料时目标的表面温度与时间的关系。使用电致变色材料对目标表面的温度影响也是非常显著的。当采用普通隐身涂料时,在一天的各个时段内目标的表面温度最高能达到 33°C , 目标的表面温度与背景温度最大温差达到 4°C , 而利用电致变色材料时,目标表面的最高温度降低到了 30°C 。目标的表面温度与背景温度最大温差只有 2°C 。

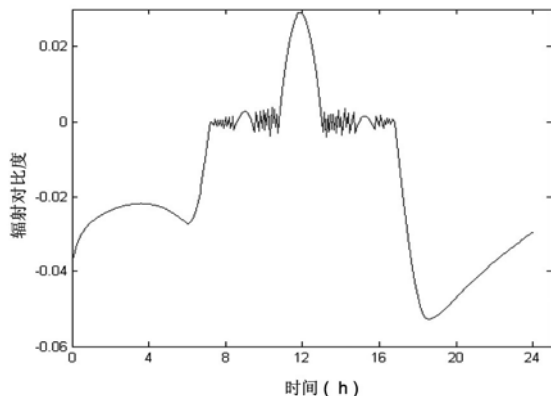


图 8 使用电致变色材料时辐射对比度与时间的关系

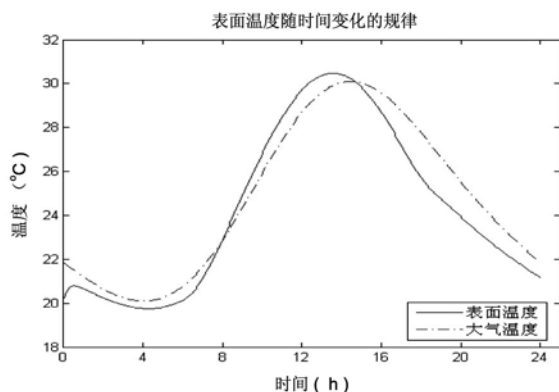


图 9 使用电致变色材料时温度与时间的关系

4 小结

目标与背景间存在的辐射能差异是红外探测系统在背景中识别目标的基础。针对一天中的环境辐射能量变化,通过对目标表面发射率的控制研究,得到以下几点结论:

(1) 目标的表面温度昼夜变化显著,且与背景存在十分明显的温度差异。使用普通的隐身涂料无法达到实时隐身的要求。

(2) 目标与背景的辐射对比度可以作为红外探测系统发现目标的基本依据,同时也可以作为目标红外隐身的评判标准。以辐射对比度小于 0.04 作为红外隐身指标,计算得到了所需要的目标表面平均发射率的变化范围。

(3) 利用电致变色材料对目标表面发射率进行控制时,隐身效率比利用固定发射率的隐身涂料提高了很多,大部分时段都能满足隐身的要求。

随着科技的发展与进步,电致变色材料的可控范围将会越来越广,目标与背景的差异将会越来越小,最终将会时时与背景完全匹配。本文的研究结果对隐身材料的研制、生产与选取有一定的指导作用。

参考文献

- [1] Crawford D M, Escarsega J A. Experimental Investigation of Polyurethane Camouflage Coating Using Dynamic Mechanical Analysis. Army Research Laboratory, 1999, 1: 1-18.
- [2] 宋兴华, 於定华, 马新胜. 涂料型红外隐身材料研究进展 [J]. 红外技术, 2004, 26(2): 9-12.
- [3] 汪小舟. 红外隐身涂料的制备及性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] 程从亮. $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 低发射率红外隐身涂料研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
- [5] 陈皿, 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.
- [6] 宣益民, 韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 20-32.
- [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: 67-68.
- [8] 陈皿, 杨立. 海面舰艇红外隐身效能评估 [J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 335-337.
- [9] Jacobs P A. Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds [C]. SPIE, 1996: 170-176.
- [10] 路远, 李玉波, 乔亚, 等. 红外发射率控制方法及机理研究 [J]. 红外技术, 2008, 30(5): 294-296.
- [11] 方鲲, 毛卫民, 吴其晔, 等. 导电高分子电致变色此案料及其在飞行器和军事伪装中的应用 [J]. 宇航材料工艺, 2004, 2: 21-25.