

文章编号:1001-5078(2007)12-1278-03

舰船 8 ~ 14 μm 波段动态红外特征模拟

陈 翱,王艳武,张 健,杨 立

(海军工程大学船舶与动力学院动力工程系,湖北 武汉 430033)

摘 要:随着红外探测与制导技术的飞速发展,对于舰船红外特征的研究具有越来越重要的军事意义。在简化舰船动态传热模型的基础之上,模拟出舰船表面瞬时温度变化与目标辐射强度的周向分布结果。模拟结果表明舰船的主要部位的表面温度在一天之中变化显著,且在同一时刻部位间的温度也存在明显差异;舰船不同时刻的辐射强度沿周向差异显著,同一时刻不同方位角上的辐射强度存在一定差异,同一时刻同一方位角上的辐射强度随仰角的增大而增大。

关键词:舰船;红外特征;温度变化;辐射强度

中图分类号:TP274⁺.52;U674 **文献标识码:**A

The Simulation of Infrared Characterization of Ship at 8 ~ 14 μm

CHEN Xuan, WANG Yan-wu, ZHANG Jian, YANG Li

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

Abstract: As the infrared detection and homing technology maturate daily, the study on infrared characterization of ship becomes more and more important. Based on the simplified heat transfer model, the surface temperature changes and distribution of radiant intensity of ship were simulated. The results showed that the temperature of main parts of ship was different in a day, and it was also different among these parts at the same time. The radiant intensity was different around the ship at different time, and it was also different at the same time with different azimuth angle, and it increased with the increase in elevation angle.

Key words: ship; infrared characterization; temperature changes; radiant intensity

1 引 言

20 世纪 80 年代以来,随着红外探测与制导技术的飞速发展,对水面舰船的生存能力提出了更高的要求。目标红外辐射特征的研究是红外探测与识别技术的基础,具有较强的理论价值与实际军事意义。在国外,有关这方面的研究开展得较早,并已取得了积极的进展。90 年代以来,美国的 ERIM 研究所已将海洋背景与目标融合起来,建立了极为精确的红外模拟方法;1999 年,加拿大的 DAVIS 公司发布了他们与美国 NRL 实验室联合开发的舰艇红外特征管理软件。但在国内,这方面的研究起步较晚,开展的工作也不是很多。上海交通大学在 1992 年以来开展舰船红外理论建模,计算模拟出静态时舰船表面温度分布^[1-2]。20 世纪 90 年代末以来,海

军工程大学热工教研室对舰船动态红外特征进行了一些初步研究^[3],模拟出舰船在一定气象条件下的瞬时温度变化。本文在简化舰船动态传热模型基础之上,模拟舰船表面瞬时温度场与目标辐射强度的周向分布情况。

2 舰船目标表面温度模拟

舰船表面温度的模拟计算是一个具有复杂几何形状、对流与辐射耦合换热边界条件的三维瞬态导热问题。为了使动态模拟顺利进行,提出以下几条假定:①按不同的朝向(上、前、后、左、右)将舰船分

作者简介:陈 翱(1981-),海军工程大学在读博士生,工程热物理专业,主要进行目标与背景红外特征模拟及红外隐身方面的研究。E-mail:chenxuan1116@tom.com

收稿日期:2007-06-11

为许多面元(舰船简化模型如图1所示),各面元材料相同、各向同性,且朝向相同面元温度相等。②面元长、宽尺寸远大于厚度尺寸,将三维导热问题简化为一维问题处理。③各舱室室内温度恒定,且内壁面与室内空气对流换热系数一定。④忽略面元间的辐射换热。

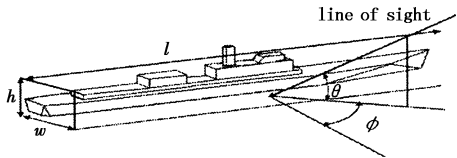


图1 舰船简化模型

面元的导热微分方程与求解边界条件分别为:
导热微分方程:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2} \tag{1}$$

内表面边界条件:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right)_{x=l} = h_{in}(t_{win} - t_{fin}) \tag{2}$$

外表面边界条件:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right)_{x=0} = q_{sun} + q_{l,sur} + q_{co}) \tag{3}$$

其中, x 为面元沿厚度方向上的坐标; τ 为时刻; $t(x,\tau)$ 为 x 位置处 τ 时刻的温度; a 为热扩散率; λ 为导热系数; h_{in} 为舱室内壁面对流换热系数; t_{win} 为内壁面温度; t_{fin} 为舱室内气温;短波辐射换热量为 $q_{sun} = \alpha_s I_{T0}$; α_s 为涂料短波吸收率; I_{T0} 为面元外表面接收到的总太阳辐照度;长波辐射换热量为 $q_{l,sur} = \alpha_l (I_{sky} + I_{sea}) - I_{wout}$; α_l 为长波吸收率; I_{sky} 为天空长波辐照度; I_{sea} 为海面长波辐照度; I_{wout} 为面元外表面辐射出射度; q_{co} 为面元外壁面与艇外空气对流换热量。

将面元结构沿厚度方向分为 N 层,每层间隔处为一节点,加上内外表面上各一节点共 $(N+1)$ 个节点,面元的传热模型如图2所示。对每个节点列节点方程,并采用有限体法对 $(N+1)$ 个节点方程进行离散。离散后的目标结构瞬态热平衡过程可表达为:

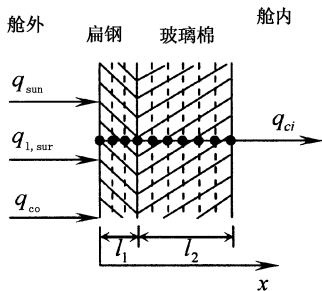


图2 面元传热模型

$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\}$ (4)
其中, $[K]$ 为传导矩阵; $[C]$ 为比热矩阵; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间导数; $\{Q\}$ 为节点热流量向量。

各舱室壁面由两种材料构成(扁钢与玻璃棉),材料参数如表1所示。

表1 面元材料参数

材料名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	厚度 /mm
扁钢	7950	440	55	8
玻璃棉	28.3	1000	33	30

本文对舰船在不同航向时其主要部位(左舷、右舷及甲板)的瞬态温度进行了模拟,模拟结果如图3所示。从图中可以发现,主要由于太阳辐射的影响,舰船各部位的温度一天之中变化显著,且各部位间的温度也存在比较明显的差异。正午时分,由于太阳直射的原因,甲板的温度最高;夜间以及凌晨时,由于天空温度较低,甲板与天空由辐射的形式换热强度较大,所以此时段甲板温度最低。

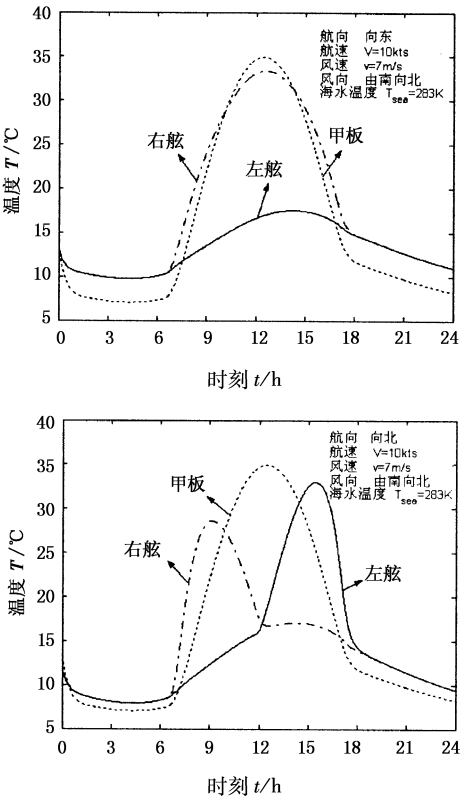


图3 舰船各部位温度瞬时模拟结果

3 舰船目标辐射场模拟

红外探测器的工作波段一般为3~5μm和8~14μm。针对海面舰船,采用8~14μm工作波段的

探测器可以有效地抑制海面背景杂波的干扰对目标进行探测和识别。所以,对舰船目标 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射特征的研究是非常重要和有意义的。

目标的辐射包括自身的辐射以及对背景辐射的反射。目标的辐射强度和探测器视线的方向密切相关。可以用仰角 θ 和方位角 φ 来定义视线的方向,如图1所示。目标的辐射强度 $I_{\theta,\varphi}(T_t)$ 可以表示为:

$$I_{\theta,\varphi}(T_t) = [\varepsilon_t \cdot M_b(T_t) + \rho_l \cdot (E_{\text{sky}} + E_{\text{sea}}) + \rho_s \cdot E_{\text{sun}}] \cdot A_{\text{proj}} / \pi \quad (5)$$

其中, T_t 为目标温度; ε_t 为目标发射率; $M_b(T_t)$ 为温度为 T_t 的黑体辐射出射度; ρ_l, ρ_s 分别为长波与短波反射率; $E_{\text{sky}}, E_{\text{sea}}$ 与 E_{sun} 分别为天空、海面与太阳辐照度; A_{proj} 为目标的投影面积。对于三维目标,投影面积可表示为:

$$A_{\text{proj}} = wh \cos \theta \sin \varphi + lh \cos \theta \cos \varphi + lw \sin \theta \quad (6)$$

其中, l, w, h 为目标的长、宽和高。

在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段研究目标辐射特征时,通常忽略太阳辐射的影响,而且从图3中可以看出,同一时刻由于面元法线方向不同,目标各部位温度存在明显差异。探测器按某一方向 (θ, φ) 侦察目标时,最多只能探测到三种法向互相垂直的系列面元。设在某一时刻这三种面元的温度分别为 T_1, T_2 与 T_3 。对应温度为 T_1 的这一系列目标面元的总辐射强度为:

$$I_{\theta,\varphi}(T_1) = [\varepsilon_t \cdot M_b(T_1) + \rho_l \cdot (E_{\text{sky}1} + E_{\text{sea}1})] \cdot A_{\text{proj}1} / \pi \quad (7)$$

其中, $E_{\text{sky}1}, E_{\text{sea}1}$ 分别为天空与海面对这系列面元的辐照度; $A_{\text{proj}1} = wh \cos \theta \sin \varphi$ 。同理对应温度为 T_2 与 T_3 的系列面元的总辐照度分别为:

$$I_{\theta,\varphi}(T_2) = [\varepsilon_t \cdot M_b(T_2) + \rho_l \cdot (E_{\text{sky}2} + E_{\text{sea}2})] \cdot A_{\text{proj}2} / \pi \quad (8)$$

$$I_{\theta,\varphi}(T_3) = [\varepsilon_t \cdot M_b(T_3) + \rho_l \cdot (E_{\text{sky}3} + E_{\text{sea}3})] \cdot A_{\text{proj}3} / \pi \quad (9)$$

其中, $A_{\text{proj}2} = lh \cos \theta \cos \varphi, A_{\text{proj}3} = lw \sin \theta$ 。所以目标沿视线方向 (θ, φ) 的辐射强度可表示为:

$$I_{\theta,\varphi}(T_t) = I_{\theta,\varphi}(T_1) + I_{\theta,\varphi}(T_2) + I_{\theta,\varphi}(T_3) \quad (10)$$

考虑目标 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的辐射特征时,式(10)可变为:

$$I_{\theta,\varphi}^{8 \sim 14}(T_t) = \eta^{8 \sim 14}(T_1) \cdot I_{\theta,\varphi}(T_1) + \eta^{8 \sim 14}(T_2) \cdot I_{\theta,\varphi}(T_2) + \eta^{8 \sim 14}(T_3) \cdot I_{\theta,\varphi}(T_3) \quad (11)$$

其中, η 为与波段 $\Delta\lambda$ 和温度 T 相关的系数。

舰船 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的辐射强度如图4所示。图4分别模拟了船头向东与船头向北两种情况时目标不同时刻的周向辐射强度以及仰角对辐射强度的影响。模拟结果表明舰船目标的辐射强度沿周向在不同时刻存在显著差异,中午12:00时目标的辐射强度明显大于早上5:00时目标的辐射强度。目标在同一时刻不同方位(方位角 φ 不同)上的辐射强度也存在一定差异,头尾小,舷侧大。并且即使在同一方位上,目标的辐射强度也随着仰角的增大而增大。

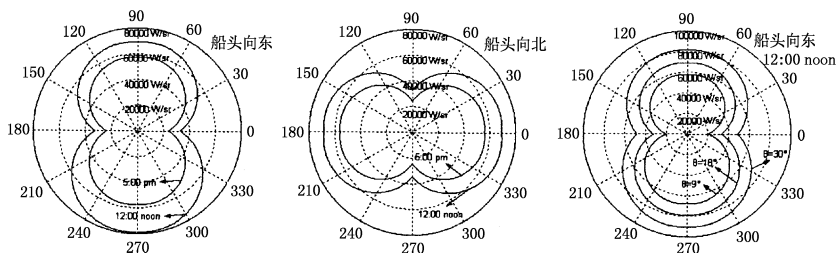


图4 舰船 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段辐射强度方向图

4 结论

通过对舰船红外特征的研究,可以得出以下几点结论:

(1) 舰船的主要部位(左舷、右舷与甲板)的表面温度在一天之中变化显著,且在同一时刻部位间的温度也存在明显差异。由于甲板法线方向与天空垂直,所以正午时,甲板受太阳辐射强烈,其温度最高;午夜或凌晨时,天空温度较低,甲板与天空辐射换热较大,此时甲板的温度最低。

(2) 舰船不同时刻的辐射强度沿周向差异显著;同一时刻不同方位角上的辐射强度存在一定差异;同一时刻同一方位角上的辐射强度随仰角的增大而增大。

参考文献:

- [1] 栗鹏义. 军舰红外热像理论建模研究[D]. 上海交通大学, 1995: 2-40.
- [2] 朱文勇, 高景, 周刚慧. 舰船红外成像模拟[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(2): 129-133.
- [3] 寇蔚, 杨立, 孙丰瑞. 一种舰船红外特征的动态模拟方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(4): 148-151.