

doi: 10.7690/bgzd.2022.07.014

红外成像靶船辐射特性模拟设计

李桂芝, 韩璐, 武庆威

(中国人民解放军 92941 部队 44 分队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对采用典型舰船实测分析与理论计算相结合的方法, 通过对舰船烟囱和动力舱等关键部位红外辐射特性进行研究, 构建典型舰船红外辐射分布几何模型。利用水平投影和网格划分方法, 对典型舰船目标红外辐射面积和辐射温度空间分布特性进行量化提取, 完成模拟典型舰船目标形状和红外特性靶体的设计。与实船对比测试结果表明, 该设计实现了对模拟靶船逼真程度评估。

关键词: 靶船; 红外特性; 辐射温度; 模拟设计

中图分类号: TJ760.6 **文献标志码:** A

Simulation Design of Radiation Characteristics of Infrared Imaging Target Ship

Li Guizhi, Han Lu, Wu Qingwei

(No. 44 Team, No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: The infrared radiation characteristics of the key parts of the ship, such as funnel and power cabin, are studied by using the method of combining the measurement analysis and theoretical calculation of the typical ship, and the geometric model of the typical ship infrared radiation distribution is constructed. The spatial distribution characteristics of infrared radiation area and radiation temperature of typical ship targets are quantitatively extracted by using horizontal projection and grid division methods, and the design of target body simulating the shape and infrared characteristics of typical ship targets is completed. Compared with the real ship, the test results show that the design realizes the realistic evaluation of the simulated target ship.

Keywords: target ship; infrared characteristic; radiation temperature; simulation design

0 引言

红外制导武器配备被动式红外自动导引系统, 通过探测目标的红外热量捕获目标^[1]。红外导引头通常采用“人在回路”^[2]的制导方式, 要求能够在特定距离外发现并跟踪目标, 对红外靶标的几何外形、成像分辨率、红外辐射亮度和纹理分布特性等指标提出了更高要求; 因此, 靶船应具备红外成像功能, 即能够模拟典型舰船的几何形状、尺寸、辐射面积以及辐射亮度。以往使用的红外点源靶^[3]无法满足对导引头精确打击性能的有效评价。随着红外导引头的广泛应用, 红外成像靶船与典型舰船在红外目标特性方面的模拟逼真度^[4]已成为红外成像靶船研制的关键技术。

1 典型舰船目标红外特性分析

1.1 典型舰船红外辐射特性实测分析

舰船的红外辐射特性受太阳辐射、大气背景温度和湿度等诸多因素的影响, 舰船的红外辐射温度可能高于或低于海面背景红外辐射温度^[5]。通常,

在白天, 舰船侧舷的向阳面表面辐射温度比海面温度高, 而不受太阳光照射的舰船侧舷表面温度比海面温度低; 在夜间, 舰船两侧表面辐射温度比海面温度低。在码头测量的舰船分别与海面、码头地表面在红外辐射波段为 8~12 μm 的辐射温差数据, 如表 1 所示。

表 1 舰船与海面的红外 8~12 μm 辐射温差 $^{\circ}\text{C}$

测量时刻	与码头温差	与海面温差
07:21	-0.27	-2.78
10:15	4.98	2.24
13:06	1.43	9.89
16:08	-3.20	9.63
19:04	-2.26	-1.41
22:49	-0.35	-6.51
03:10	0.34	-6.73

通过以上分析表明, 在不同时间段的舰船目标与不同背景的辐射温度均具有较大差异。在某一特定条件下, 红外成像靶能够模拟实现真实舰船红外辐射温差特性在海天背景下很宽范围的变化。

通过测量获取某型舰船的红外图像。图像显示温度最高部位位于烟囱处, 且温度从烟囱顶部向下逐渐变低, 舰船发动机所在的前、后动力舱部位温

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 李桂芝(1967—), 女, 山东人, 硕士, 正高级工程师, 从事光电测量技术研究。E-mail: qaz434612572@163.com。

度比周围船体温度略高，位于侧舷的动力舱部位清晰可见。舰船烟囱和动力舱部位是舰船的主要热辐射源区，也成为红外成像制导武器跟踪和识别目标的重要特征。基于对大量舰船目标红外辐射特性测量数据的统计分析^[6]，对烟囱和动力舱等典型部位与其他部位辐射温差控制是实现舰船红外特性模拟的关键技术，即在特定的气象条件下，对于成像制导武器系统，红外成像靶主要模拟范围是舰船典型部位(烟囱和动力舱)与海面的红外辐射温差和形状。

1.2 典型舰船红外特性仿真分析

对典型舰船几何构型和红外辐射温度分布特性进行数学建模，同时用实测数据验证仿真结果的正确性^[7]。海面舰船目标红外特性仿真计算流程如图 1 所示，具体步骤为：1) 对舰船目标的几何构型进行建模，生成微元；2) 对单个微元建立热平衡方程，并对所有微元联立方程组进行计算机数值求解，得到微元真温；3) 通过获得微元外表面的表观辐射量和表观温度，从而得到目标的红外辐射场分布。

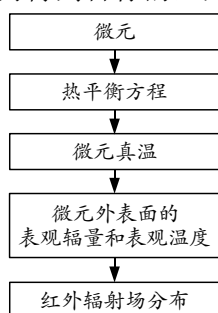


图 1 目标红外辐射计算流程

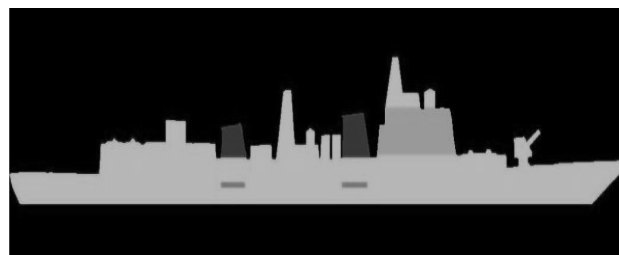
2 靶船红外辐射特性模拟设计

基于典型舰船红外辐射分布特性的研究成果，采取水平投影的方式将典型舰船模型图做进一步简化设计，重点显示烟囱和动力舱形状及位置；采用网格划分方法，将舰船主要辐射区域划分成数个微元，并细分出典型舰船主要辐射源面积和相对位置关系；通过计算得到微元真温，获得目标的红外辐射场分布，实现对目标烟囱和动力舱辐射面积的相似度模拟。

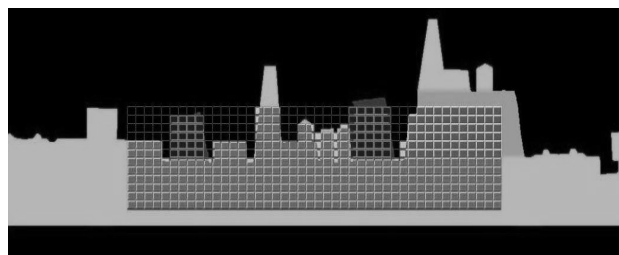
图 2(a)为简化处理后的舰船正向侧面红外仿真分布图，图 2(b)、图 3 分别为网格化处理后的分布图和主要辐射源提取后的靶船设计图。

计算舰船烟囱和动力舱面积模拟的相似度：

相似度=1-[靶船(烟囱或动力舱)面积-舰船(烟囱或动力舱)面积]/舰船(烟囱或动力舱)面积×100%。



(a) 舰船正向侧面红外仿真分布



(b) 舰船烟囱和动力舱部位网格

图 2 舰船红外仿真分布图与网格划分

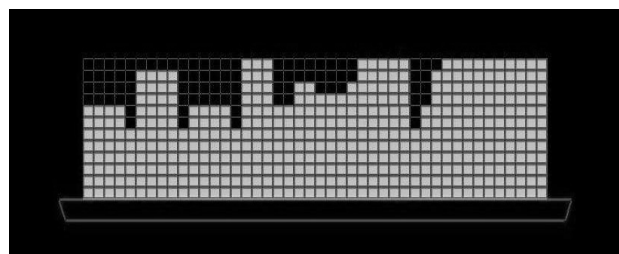


图 3 红外成像靶船设计

利用红外目标特性分析处理软件获得的舰船模拟相似度的计算结果如图 4 所示。其中，烟囱模拟面积测量 2 次数值为 44.6 m²、44.0 m²，烟囱实际面积为 40.7 m²；动力舱模拟面积测量 2 次数值为 5.8 m²、5.7 m²，动力舱实际面积为 6.3 m²。由计算结果可得：烟囱部位和动力舱部位模拟相似度最小值为 90.26%，模拟相似度较高。

烟囱	
模拟	44.6 44.0
实际	40.7
相似度	90.44% 92.11%
动力舱	
模拟	5.8 5.7
实际	6.3
相似度	91.66% 90.26%

图 4 相似度计算结果

3 靶船红外辐射特性测试及评估

试验对靶船红外特性一般要求主要为辐射源(烟囱外壁和动力舱)与海面实际辐射温差不小于 2 K。

目标红外辐射包括自身辐射和环境辐射 2 方面，当探测器在测试一定距离情况下的目标时，其接收到的不仅是目标通过大气传输后的自身辐射，

同时也接收到了环境辐射。目标表现红外辐射亮度 L_r 可表示为^[8]：

$$L_r = L_0 \cdot \tau_r + L_{\text{env}} \quad (1)$$

式中： L_r 为距离 r 条件下测量的目标表现辐射亮度； L_0 为零距离条件下测量的目标表现辐射亮度； τ_r 为对应距离为 r 条件下的大气透过率； L_{env} 为环境辐射亮度。要完成 L_0 的计算，就必须先得到 τ_r 和 L_{env} 值。

测试前，首先完成在当时气象及测试条件下 τ_r 和 L_{env} 的计算标定。依据式(1)，只需要获得 2 组 (L_{rT1}, L_{0T1}) 、 (L_{rT2}, L_{0T2}) 测量值，通过建立方程组，便可求解出 τ_r 和 L_{env} 值。即：

$$\left. \begin{aligned} L_{rT1} &= L_{0T1} \cdot \tau_r + L_{\text{env}} \\ L_{rT2} &= L_{0T2} \cdot \tau_r + L_{\text{env}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： L_{rT1} 和 L_{rT2} 分别为在 r 测试距离条件下通过红外热像仪测得的靶船动力舱 1 和动力舱 2 的红外辐射亮度值； T_1 和 T_2 分别为动力舱 1 和动力舱 2 的加热温度，且 $T_1 \neq T_2$ ； L_{0T1} 和 L_{0T2} 分别为在距离动力舱 2 m 情况下（等效为零距离）通过红外热像仪测得的靶船动力舱 1 和动力舱 2 的红外辐射亮度值。

目标红外辐射温度为 T 的辐射亮度：

$$L_0 = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (C_1 / \lambda^5 \pi) \cdot (1 / (e^{C_2 / \lambda T} - 1)) d\lambda \quad (3)$$

式中： λ 为波长； C_1 为第一辐射常量； C_2 为第二辐射常量； ε 为目标（红外靶面为钢板材料）表面发射率（经查表可获得），都为已知条件。

将计算出的 L_0 代入式(3)进行逆运算，便可获得靶船零距离情况下的红外辐射温度 T 。同理，计算出靶船周围海域的海水辐射温度 T_{sea} 。而测量辐射温差值为： $\Delta T = T - T_{\text{sea}}$ 。

在海上测试，对靶船在真实海天背景条件下靶船控温精度进行有效评估，靶船与实船进行红外目标特性对比测试，采用标定过的长波红外热像仪（ThermaCAMTMS65，波段：7.5~13 μm ）分别检测

靶船和某型舰船烟囱壁与海面辐射温度，计算出相对海面的辐射温差，靶船烟囱壁与海面辐射温差为 3~16 K，靶船动力舱与海面辐射温差为 3~12 K，测试结果表明靶船红外模拟系统性能和指标均满足设计要求。

4 结论

通过对典型舰船红外辐射特性进行研究，实现对典型舰船红外目标分布特性的较真实模拟，能够模拟典型水面目标侧向的基本外形以及主要辐射源的分布和红外特性。通过获取靶船不同辐射温度条件下的多组辐射亮度值，解算测试距离和测试环境下的大气透过率及环境辐射亮度，反推得到靶船测试时零距离红外辐射亮度值及温度值；通过与实船对比测试，获得靶船红外辐射特性的评估，为红外分布式机动靶标和红外/雷达复合靶标的研制与应用提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 卢胜峰. 红外导弹目标模拟系统的实现[J]. 测控技术, 2013, 32(1): 132-136.
- [2] 刘琨. 基于电视体制的“人在回路”制导链路关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [3] 杜鹏, 余建军, 刘维国. 一种新式舰船红外靶标设计方法研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(9): 151-155.
- [4] 周亚凡, 赵军王, 东阳高, 等. 红外靶船逼真度和可信度的检测与评估[J]. 红外, 2013, 34(7): 39-44.
- [5] 姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境光学特性[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009, 21(6): 63-78.
- [6] 刘振兴, 王发龙. 水面舰艇对抗雷达/红外成像复合制导仿真[J]. 红外技术, 2009, 31(11): 650-654.
- [7] 姜笛, 张科, 吕梅柏. 一种高效的舰船红外辐射特性的建模方法[J]. 光电与控制, 2014, 21(6): 94-98.
- [8] 马菊, 赵翠玲, 赵薇. 近红外波段透雾能力量化分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(1): 45-49.