



分层海水条件下潜艇热尾流机载红外探测性能分析

李英超 潘泽 李冠霖 史浩东 付强

Analysis of airborne infrared detection performance of submarine thermal wake in stratified seawater

Li Yingchao, Pan Ze, Li Guanlin, Shi Haodong, Fu Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220741>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于重叠网格技术和VOF模型的潜艇热尾流浮升扩散规律的数值与实验研究

Numerical and experimental study on the buoyancy and diffusion laws of submarine thermal wake based on overset grid technology and VOF model

红外与激光工程. 2019, 48(4): 404002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0404002>

衍射光学系统红外光谱目标探测性能

Target detection performance of infrared spectrum with diffractive optical system

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20200371 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200371>

星载红外探测器对高超声速飞行器探测距离的计算

Detection distance computation of the space borne infrared detector for hypersonic flight vehicles

红外与激光工程. 2019, 48(7): 704003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0704003>

短中波红外探测系统宽波段高透过率薄膜

Short-medium infrared detection system broadband high transmittance film

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1017001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1017001>

基于波前编码的大焦深弹载双色红外探测系统

Double bands missile-borne infrared detection system of extended focus depth based on wavefront coding

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0404001 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0404001>

高超声速飞行器红外探测窗口辐射透射特性研究

Radiative transmission property of infrared window in hypersonic vehicle

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0404002 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0404002>

分层海水条件下潜艇热尾流机载红外探测性能分析

李英超¹, 潘 泽^{1,2*}, 李冠霖¹, 史浩东^{1,2}, 付 强¹

(1. 长春理工大学 吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对传统机载红外探测潜艇热尾流的计算方法未考虑温度、密度分层海水等实际海况, 难以精准分析潜艇热尾流红外探测性能的问题。文中基于有限元分析方法, 结合海面红外辐射模型和大气传输模型, 构建出尾迹从浮升扩散、大气衰减到传感器探测的全链路数理模型, 并应用模型开展全尺寸潜艇模型的仿真, 实现在温度、密度分层海水情况下对潜艇热尾流红外探测性能的精准分析。结果表明: 海水温度、密度分层条件对于潜艇尾迹的仿真和反演精度至关重要, 当其他条件都相同时, 海水温度、密度分层与不分层仿真出了截然相反的结果, 不分层条件下海面为热尾迹, 而分层条件下海面却为冷尾迹, 直接影响对潜艇热尾迹反演精度。相比于海水分层, 不分层情况下潜艇的反演误差达到了 238.2 m, 水面的尾迹温差不但相差了 0.152 K, 还呈现出了冷尾迹的现象。文中的研究对机载红外设备发现潜艇航行尾流特性的高精度识别反演具有重要意义。

关键词: 潜艇; 温度分层; 热尾流; 红外探测

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220741

0 引 言

随着潜艇减震降噪技术的发展及快速深浅能力的提高, 单一的声纳探测技术在反潜探测中暴露了不足之处^[1]。国外低空机载高灵敏度红外探测系统已可分辨海面 0.001 K 的温差变化^[2], 可以通过红外系统探测热尾流, 进而获取或判断潜艇的位置坐标、航向、航深和速度等重要信息。而水体与潜艇热尾流的作用时间长, 水体性质微小的变化都会累积在尾流浮升的过程中, 因此将水体视为均匀分布可能会引起一定的偏差, 导致反演精度误差变大, 计算效果与实际效果相差变大。

国外对此研究较早, 1979 年美国陆军夜视与电子传感器局 (NVESD) 实验室的 F.Rosell 等人, 引入了最小可分辨温差 (MRTD) 理想同步积分器模型, 并基于约翰逊准则估算系统作用距离^[3]。1997 年, 澳大利亚的 Wren 等人对利用潜艇的热排放水探测潜艇的可行性进行了研究, 指出以 5 kn 速度航行潜艇的后面海水温度瞬间升高 0.2 K^[4]。2021 年 8 月, 波兰军事大学光

电研究所的 Krzysztof Firmanty 等人提出了一种理论, 该理论用来确定系统的基本技术参数, 包括噪声等效温差 (NETD)、最小可分辨温差 (MRTD) 的检测、识别和识别范围等^[5]。国内的研究起步相对较晚, 主要是对红外系统 MRTD 的算法进行改进。2011 年, 南京航空航天大学张鹏等人依据 MRTD 理论研究了红外热成像系统的视距估算模型^[6]。2015 年, 武汉船舶第二设计研究所王建勋等人从热尾流产生到被探测的几个主要因素入手, 建立各个部分的计算模型, 形成红外探测作用距离的工程估算方法, 分析红外探测的作用距离^[7]。2020 年, 哈尔滨工业大学的高继鹏对不含螺旋桨的简化潜艇模型进行温度分层水体和温度不分层水体环境下全尺寸的热尾流浮升仿真, 探究航速、跃层位置等条件对水面红外特性的影响^[8]。2021 年, 西安工业大学的王程英等人主要分析了船舶远场的非线性特征包括热尾流特性和热分层环境下船模尾流的温度特性^[9]。目前, 通过 MRTD 分析热尾流探测的计算方法大多是将水体视为均匀分布海水, 而海水温度、密度分层的性质对潜艇热尾流在海面温

收稿日期: 2023-01-15; 修订日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (61890964)

作者简介: 李英超, 男, 教授, 博士, 主要从事多维度光学特性测试与探测技术, 先进光学成像测试领域。

通讯作者: 潘泽, 男, 硕士生, 主要从事红外探测与光学系统设计方面的研究。

度分布、浮升时间、尾迹浮升距离的反演精度都有着巨大影响。而国内外的研究主要是对于红外系统的 MRTD 算法的改进或者根据系统其他参数推导红外探测器的探测能力,以及天气等因素对尾流探测的影响,并未结合海水分层对尾流探测及反演的影响进行分析。因此在温度、密度分层海水条件下开展热尾流红外辐射探测的研究对潜艇的红外探测具有重要意义。

针对目前缺少在海水温度、密度分层情况下分析潜艇热尾流红外探测,导致探测距离计算误差大、潜艇反演精度误差大的问题。文中基于有限元分析方法,开展了海水分层条件下潜艇红外辐射特性研究。首先,利用有限元分析方法对包含螺旋桨、舰桥特征的全尺寸潜艇模型在分层海水中对潜艇热尾流的浮升过程进行仿真;然后,根据海面红外辐射模型、大气传输模型构建尾迹从浮升扩散、大气传输、大气衰减、大气传输到传感器探测的全链路数理模型,并针对特定红外探测器性能参数,计算分层海水情况下,红外探测器对潜艇热尾流的探测距离。通过对比分析,得到海水的温度、密度分层对红外探测器对海面尾迹探测和反演精度的影响,为进一步提高潜艇尾迹红外探测精度提供支撑。

1 基本原理

1.1 有限元分析仿真模型

为研究海水温度、密度分层对红外探测距离和反演精度的影响。文中建立了全尺寸、包含舰桥和螺旋桨特征的三维模型,通过有限元方法进行对比和分析。

因为文中研究的是水体与空气的分界面,所以采用的是两相流模型(vof)^[10],将区域分成空气和水两部分

进行仿真,将海—气交界面处视为海平面,分析潜艇热尾流的浮升和扩散。全尺寸潜艇仿真模型如图 1 所示。

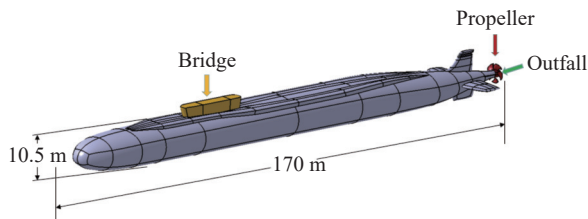


图 1 全尺寸潜艇仿真模型

Fig.1 Full scale submarine simulation model

参照海水物性参数随温度变化数据拟合得计算所用相应物性参数关系式如下^[11]:

$$\rho = 644.895 + 2.612T - 0.005T^2 \quad (1)$$

$$c_p = 6\,545.302 - 15.377T + 0.025T^2 \quad (2)$$

$$k = -0.666 + 0.007T - 8.669 \times 10^{-6}T^2 \quad (3)$$

$$\mu = 0.029\,303 - 0.000\,132T + 4.109 \times 10^{-10}T^3 \quad (4)$$

式中: ρ 为密度 (kg/m^3); c_p 为定压比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$); T 为温度 (K); k 为导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); μ 为粘性系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。当有太阳光照射时,海水表层区域接收太阳的热量比海水下层多,使得上层水温高于下层,即海水存在垂直负温度梯度,表层海水到 1000 m,水温随深度增加而迅速递减,1000 m 以下,水温下降变慢。潜艇的下潜深度一般不超过 600 m,文中考虑的深度为 50 m,此深度海水温度分布近似为线性,选用海水垂直负温度梯度为 $-0.1667 \text{ K}/\text{m}$ 。当水面温度为 293.15 K 时,温度深度关系式为:

$$T = 293.15 - 0.166\,67H \quad (5)$$

式中: H 为海水深度^[12]。海水深度与温度关系图如图 2 所示。

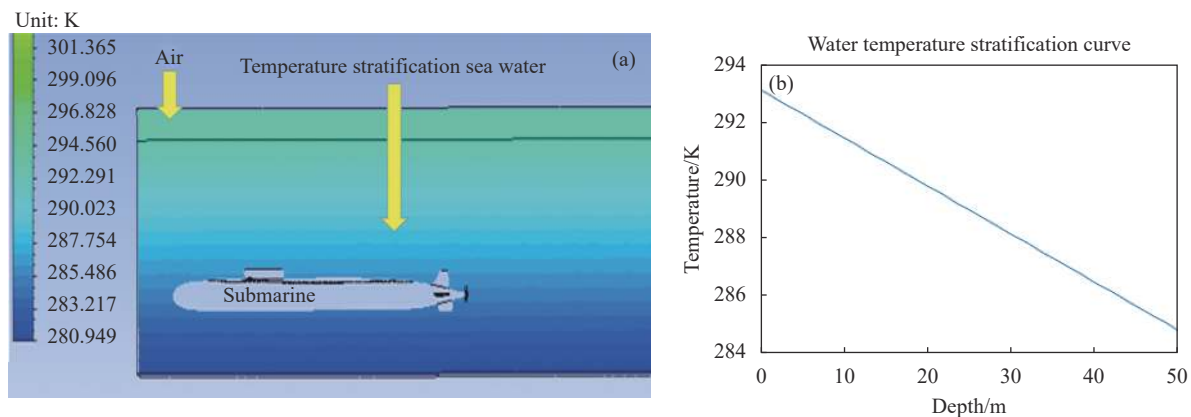


图 2 (a) 水体温度分层效果图; (b) 水体温度分层曲线图

Fig.2 (a) Effect diagram of water temperature stratification; (b) Diagram of water temperature stratification curve

1.2 海洋流体数学模型

根据质量守恒方程和动量守恒方程整理得到:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \rho - \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} - \nabla \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + f_b + \rho \cdot \mathbf{g} \quad (6)$$

将潜艇热尾流的初始速度矢量初始温度 T 代入公式 (6) 便可求得流体的运动变化, 再根据能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} c_p T) = \nabla (k \nabla T) \quad (7)$$

求得温度 T 的变化。其中, f_b 为每单位体积的表面积力 (N/m^3); \mathbf{u} 为速度矢量 (m/s); p 为流体静压 (Pa); \mathbf{g} 为重力加速度矢量 (m/s^2) 将整个系统分割成有限个单元, 对每个单元根据上述公式进行求解最终求得海面尾流的温差 ΔT 。

1.3 海面到探测器接收的红外辐射模型

对于以面源形式存在的热尾流, 在估算红外探测器对其的作用距离时, 一般用最小可分辨温差法, 即:

$$\Delta T \geq \frac{\pi^2 \cdot SNR_d \cdot f \cdot NETD \cdot \sqrt{a \cdot b}}{8 \cdot \tau_s \cdot \varepsilon \cdot \tau(R) \cdot MTF(f) \cdot \sqrt{t_0 \cdot t_i \cdot f_p \cdot \Delta f \cdot n_e \cdot \alpha_0}} \quad (8)$$

式中: SNR_d 为观察者能分辨线条的阈值信噪比; a 、 b 分别为瞬时视场的水平和垂直张角; t_0 为扫描驻留时间; t_i 为人眼的积分时间; f 为空间频率; f_p 为帧频; Δf 为等效噪声带宽; $MTF(f)$ 为调制传递函数; τ_s 为光学系统透过率; $NETD$ 为噪声等效温差; n_e 为某一探测概率对应的等效条带对数; α_0 为目标的长宽比; α_0 可根据热尾流的长度 s 和宽度 b 参数进行计算, 要注意到热尾流 s 可能会超出探测器的视角范围, 此时计算目标长度需要根据视场角和观测距离进行修正, 即长度变为 $R\alpha$ 或 $R\beta$ 系统的调制传递函数 MTF 用以衡量系统如再现现场的程度。其中, R 为红外辐射源与探测器之间的距离; $\tau(R)$ 为大气平均透过率; ε 为海水的发射率。到达探测器的红外辐射, 海面红外辐射并非 100% 辐射, 其辐射量由海水的发射率决定, 若用温差关系进行描述^[13]。从海面发出的红外辐射需要经过大气作为传输介质最终到达探测器, 大气对红外辐射的衰减过程中吸收和散射的影响最为明显^[14]。在实际应用中, 探测器都有一定的响应波段, 一般认为在探测器的响应波长内, 大气对红外辐射的透过率

与波长无关, 可用平均值来近似大气平均透过率。不等式 (8) 的右边为最小可分辨温差计算模型^[15], 是以观察者主观视觉为准, 用以综合评价红外探测器性能的重要参量, 它用来表示红外探测器在不同空间频率下的温度灵敏度。

红外探测器的 MTF 由 3 个分系统即光学系统、探测器、电路的 MTF 决定^[16]。以圆形孔径的衍射限光学系统为例, 其光学系统的 MTF 为 3 个分系统 MTF 的乘积, 即:

$$MTF = MTF_o \times MTF_d \times MTF_e$$

$$MTF = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left(\frac{f}{f_c} \right) - \left(\frac{f}{f_c} \right) \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \times \frac{\sin \left(\pi \omega^{\frac{1}{2}} f \right)}{\left(\pi \omega^{\frac{1}{2}} f \right)} \times \left[1 + \left(2 \omega^{\frac{1}{2}} f \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: f_c 为光学系统的空间截止频率 (c/mrad), 且有 $f_c = D_0/\lambda$, λ 为平均工作波长; D_0 为红外探测器的通光孔径; ω 为系统的瞬时视场。

探测概率与等效条带对数 n_e 的关系由 Johnson 准则给出。此外还需要满足:

$$\frac{W}{2n_e R} \geq \frac{1}{2f} \quad (10)$$

式中: W 为热尾流的临界宽度。若想求得红外探测器能够探测目标的最大作用距离, 只需满足等式条件即可得到唯一对应的 R 。

通过以上分析, 当海面热尾流的红外辐射值传递到探测器并大于探测器的 MRTD 时, 且目标对系统张角大于系统的最小分辨角度即认为探测器可探测到的热尾流。首先需要根据热尾流参数估算模型计算出热尾流的尺寸和温差, 然后使用 MODTRAN 软件对探测器的波段的大气透过率进行拟合求得大气平均透过率 $\tau(R)$, 然后根据 Johnson 准则给出得探测率和探测等级确定等效条带对数 n_e 计算出探测器此时的 MRTD。若满足公式 (8) 和公式 (10) 则可以探测, 若不满足则视为无法探测。

2 分析与讨论

仿真区域的整体尺寸为 $600 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 70 \text{ m}$, 其中水深 60 m , 空气 10 m 。潜艇模型位于水下 50 m 。文

中所使用的潜艇模型长 170 m, 最大直径 13.5 m, 热尾流排水口视为半径为 1 m 的圆面, 从潜艇尾部排出。文中选用的红外探测器参数: $F\#$ 为 1, 工作波长 8~12 μm , 探测器分辨率 640×512 , 取临界宽度 $W=6$ m, $\Delta f=49$ Hz, $SNR_d=4$, $NETD=0.015$ K, $f_p=50$ Hz, $f_c=4$ c/mrad, $t_0=0.016$ s, $t_i=0.2$ s, $a=b=0.425$ mrad, $\tau_s=0.8$ 。文中对潜艇热尾流的浮升过程进行了仿真分析,

仿真模型设置航行速度 $V=1$ m/s。热尾流排水口的流速为 $V_r=1.5$ m/s, 潜艇的热尾流温度设置为 325 K。对水体温度和密度分层的海水进行仿真, 水面的温度均取常温 293.15 K。仿真得到的水面温度分布图如图 3(a) 所示。在相同工况下水体的温度和密度不分层的情况下再次进行仿真得到水面分布如图 3(b) 所示。

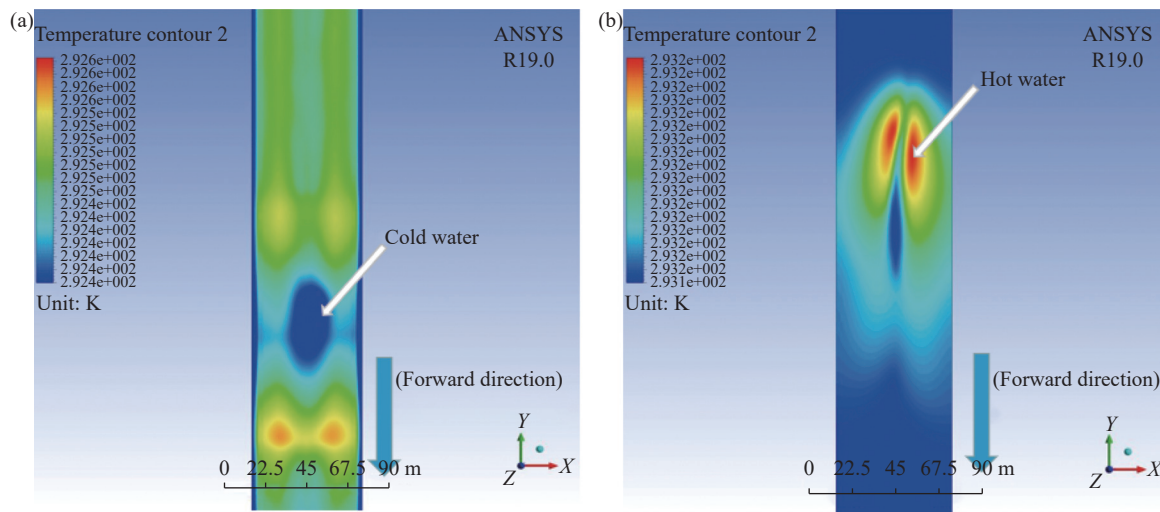


图 3 (a) 水体密度、温度分层条件下水面温度分布图; (b) 水体密度、温度不分层条件下水面温度分布图

Fig.3 (a) Temperature distribution map of water surface under conditions of water density and temperature stratification; (b) Temperature distribution map of water surface under conditions of uniform water density and temperature

由图 3(a) 可知, 潜艇的尾流在水面呈现出冷尾迹现象, 此时温度异常区域的最低温度要比海平面的平均温度低 0.235 K。由于温度分层, 在水下 50 m 处的水温度更低, 因此水体密度也随之变大。当排出的热尾流温度、密度相同时, 更大的密度差有利于热尾流上浮。当热尾流浮升速度大于热交换速度时, 水面下冷水会被尾流排出的热尾流向上一同带到水面。因此, 在水面形成了冷尾迹现象。相同工况下, 不分层水域潜艇的尾流温度高于水面的平均温度。此时尾流所在温度异常区域的最高温度要比海平面的平均温度高 0.083 K。当海水温度密度不分层时, 热尾流排出后相比前者密度差更小, 在浮升速度上也相对较慢, 热尾流在浮升过程中有更长的时间与水体进行热交换, 因此, 浮升至水面后的温差也相对较小。

使用 MODTRAN 得到了垂直向下探测情况下热带夏季海洋气溶胶条件下不同距离对应的 8~12 μm 大气平均透过率, 如表 1 所示。

表 1 热带夏季海洋气溶胶条件下不同距离对应的 8~12 μm 大气平均透过率

Tab.1 Average atmospheric transmittance corresponding to different distances under the conditions of tropical summer marine aerosol at 8-12 μm

Distance/km	0	1	2	3	4	5
Atmospheric transmittance	1	0.69	0.58	0.54	0.52	0.51

对曲线进行拟合可以得到大气透过率与距离的拟合关系式, 即:

$$\tau(R) = 0.4858e^{-1.008R} + 0.514 \quad (11)$$

得到探测距离与 n_e 的关系, 如表 2 所示。

通过对比可以发现, 海水分层条件对尾流的探测影响比较大。在探测概率都为 95% 的情况下, 尾流的发现距离提升了 10.61%, 尾流的识别距离提升了

表 2 探测距离与等效条带对数关系

Tab.2 Relationship between detection distance and equivalent strip logarithm

n_e		2	8	16
R/km	Uniformity	5.832	1.492	0.761
	Layered	6.451	1.631	0.824

9.32%，尾流的认清距离提升了 8.28%。在分层水情况下，尾迹是以冷尾迹的形式呈现在水面上，冷尾迹与海面温差比不分层水情况下热尾迹与海面温差大了 0.152 K。通过尾流的浮升时间可以推算出潜艇距离尾流区域的水平距离，通过计算可知在不分层海水的情况下潜艇向前行进了 340 m，而在温度密度分层海水情况下潜艇则航行了 101.8 m，相比于海水分层，不分层情况下潜艇的反演误差达到了 238.2 m，水面的尾迹温差不但相差了 0.152 K，还呈现出了冷尾迹的现象。由此可见，海水分层条件对于潜艇的反演精度存在影响极大，甚至直接导致错误的结果。

3 结 论

文中完成了海水温度密度分层条件下尾迹从浮升扩散、大气衰减到传感器探测全链路数理模型的建立，并通过仿真计算得到了海水温度、密度分层对尾流浮升速度的影响和红外探测系统对尾迹的探测距离以及尾迹的反演误差。即在温度、密度海水分层条件下，水下 50 m 时尾流浮升至水面所用时间为 101.8 s。而相同工况下海水不分层时尾流浮升至水面所用的时间为 340 s，在用时上远大于海水分层的情况，这是由于分层海水的水下温度更低，大的密度差有利于热尾流上浮。分层水体尾流的发现距离为 6.451 km，尾流的识别距离为 1.631 km，尾流的认清距离为 0.824 km，不分层的发现距离、识别距离、认清距离分别为 5.832、1.492、0.761 km。相比于海水分层，不分层情况下潜艇尾迹的反演误差达到了 238.2 m，水面的尾迹温差相差了 0.152 K，并出现了海面冷热尾迹不同的现象。

由于受实验条件和研究水平的限制，文中对潜艇热尾流的研究比较粗浅，还有很多问题要去研究。未来还需要针对海浪、风速、季节，以及潜艇深度、航行速度、螺旋桨扰动等影响因素导致的水面温度异常规

律开展深入研究。使之更加接近现实工况，为潜艇探测提供新的技术手段。

参考文献：

- [1] Fang Erzheng, Gui Chenyang, Wang Huan. Non-acoustic detection technology of submarines [J]. *National Defense Science and Technology Industry*, 2020(6): 66-68. (in Chinese)
- [2] Guo Yan, Wang Jiang'an. Analysis of the development of photoelectric detection in submarine exploration [J]. *Ship Science and Technology*, 2002(4): 42-45. (in Chinese)
- [3] Wang Lianzhen. Infrared imaging system modeling and comprehensive performance evaluation based on complex shipborne environment [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015. (in Chinese)
- [4] Wren G G, May D. Detection of submerged vessels using remote sensing techniques [J]. *Australian Defence Force Journal*, 1997, 11(127): 11-15.
- [5] Barela J, Firmanty K, Kastek M. Measurement and analysis of the parameters of modern long-range thermal imaging cameras [J]. *Sensors*, 2021, 21(17): 5700.
- [6] Zhang Peng. Research on the operating range of infrared thermal imaging system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [7] Wang Jianxun, Sun Guocang, Deng Haihua, et al. Engineering estimation method of thermal wake infrared detection range [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(4): 107-111. (in Chinese)
- [8] Gao Jipeng. Research on the influence of thermal wake buoyancy on the infrared characteristics of water surface under propeller disturbance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] Wang Chengying. Nonlinear physical characteristics of ship wake [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] Lai Qingzhi, Wang Cheng'an, Tan Jianyu, et al. Research on the buoyancy law and surface temperature characteristics of submarine thermal wake based on 3D dynamic grid technology [J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(5): 8-13. (in Chinese)
- [11] Liu Yang, Zhu Feiding, Tan Peiyu, et al. Numerical simulation of submarine hydrodynamic wake and thermal wake coupling [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(1): 62-67. (in Chinese)
- [12] Zhang Xiaohuai, Chen Xuan, Yang Li. The analysis and

- calculation of infrared signature of thermal wake of submarines [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(10): 1054-1057. (in Chinese)
- [13] Guo Caili. Introduction to atmospheric radiation (2nd edition) [J]. *Atmospheric Science*, 2005(3): 416. (in Chinese)
- [14] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39: 201-225.
- [15] Ratches J A, Vollmerhausen R H, Driggers R G. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: Past, present, and future [J]. *Journal of IEEE Sensors*, 2001, 1(1): 31-40.
- [16] Sun Wenfang. MRTD-based infrared imaging system performance evaluation and atmospheric impact research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)

Analysis of airborne infrared detection performance of submarine thermal wake in stratified seawater

Li Yingchao¹, Pan Ze^{1,2*}, Li Guanlin¹, Shi Haodong^{1,2}, Fu Qiang¹

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract:

Objective At present, most of the calculation methods for thermal wake detection by MRTD analysis consider the water body as uniformly distributed seawater. The stratified nature of seawater temperature and density has great influence on the inversion accuracy of submarine thermal wake on the surface temperature distribution, rise time and wake rise distance. However, the research at home and abroad mainly focuses on the improvement of MRTD algorithm of infrared system or derivation of the detection ability of infrared detector based on other parameters of the system, as well as the influence of weather and other factors on wake detection, and has not analyzed the influence of seawater stratification on wake detection and inversion. Therefore, the research on infrared radiation detection of thermal wake under the conditions of stratified seawater temperature and density is of great significance to the infrared detection of submarines.

Methods For the lack of infrared detection of submarine thermal wake under the condition of stratified sea water temperature and density, the calculation error of detection distance and inversion accuracy error of submarine are large. Based on the finite element analysis method, the research on submarine infrared radiation characteristics under the condition of seawater stratification is carried out in this paper. Firstly, the finite element analysis method is used to simulate the floating process of submarine thermal wake in stratified seawater by a full-size submarine model with propeller and bridge characteristics. Then, according to the sea surface infrared radiation model and atmospheric transmission model, the full-link mathematical and physical model of the wake from floating diffusion, atmospheric transmission atmospheric attenuation to sensor detection is built, and the detection distance of the infrared detector to the submarine thermal wake under the condition of layered seawater is calculated according to the specific infrared detector performance parameters.

Results and Discussions The comparison shows that the stratification condition of seawater has a great influence on the detection of wake. With 95% detection probability, the detection distance of the wake increases by 10.61%, the identification distance of the wake increases by 9.32%, and the recognition distance of the wake increases by 8.28% (Tab.2). In the case of stratified water, the wake is presented as a cold wake on the water surface. The temperature difference between the cold wake and the sea surface is 0.152 K larger than that between the hot

wake and the sea surface in the case of non-stratified water. The submarine travels 340 m forward without stratified seawater and 101.8 m under stratified seawater temperature and density. Compared with seawater stratification, the inversion error of submarine without stratification reaches 238.2 m, and the wake temperature difference on the surface is not only 0.152 K, but also cold wake phenomenon. It can be seen that the seawater stratification condition has a great influence on the submarine's inversion accuracy, and even directly leads to incorrect results.

Conclusions The mathematical and physical model of the wake from floating diffusion, atmospheric decay to full link of sensor detection under the condition of seawater temperature and density stratification is established. The influence of seawater temperature and density stratification on the wake floating speed, the detection distance of the infrared detection system to the wake and the inversion error of the wake are obtained by simulation calculation. That is, it takes 101.8 s for the wake to rise to the surface at 50 m under the condition of stratified seawater temperature and density. Under the same conditions, when the seawater is not stratified, the time taken for the wake to rise to the surface is 340 s, which is much longer than that for the stratified seawater. This is due to the lower underwater temperature of the stratified seawater and the large density difference conducive to the floating of the hot wake. The discovery distance of the delaminated water body wake is 6.451 km, the identification distance of the wake is 1.631 km, and the recognition distance of the wake is 0.824 km. The unclassified detection distance, identification distance and recognition distance are 5.832 km, 1.492 km and 0.761 km, respectively. Compared with seawater delamination, the inversion error of submarine wake is 238.2 m without delamination, the temperature difference of wake on water surface is 0.152 K, and the cold and hot wakes on sea surface are different.

Key words: submarine; temperature stratification; thermal wake; infrared detection

Funding projects: Major Program of National Natural Science Foundation of China (61890964)