

文章编号 1004-924X(2017)01-0107-08

红外探测中潜艇冷热尾流的传热传质特性

张旭升*, 郭亮, 胡日查, 刘春龙

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文采用有限体积法建立了1/72龙鲨II号核潜艇的三维计算模型, 结合动参考系、用户自定义函数和物性多项式函数等实现了高速旋转螺旋桨和海水温度密度分层的仿真。基于该模型, 探讨了螺旋桨高速旋转、海水温度密度分层和高温热尾流喷射等因素对潜艇冷热尾流传热传质特性的影响, 所得结论如下: 高速旋转螺旋桨促使热尾流后向延迟距离增大、海表温差减小, 忽略旋转时海表温差的绝对误差和相对误差分别为3.23 mK和52.7%; 水下航行潜艇扰动温度密度分层海水浮升形成冷尾流温差信号, 与温度密度均匀海水相比, 海表温差区域显著增大、尾流温差由6.13 mK增大到84 mK; 通过海表上游冷尾流特征判断是否存在水下航行潜艇, 若存在, 再结合海表下游热尾流特征实现潜艇位置的精确反演。上述结论可为优化潜艇冷热尾流的数值仿真精度提供参考与借鉴。

关键词: 热尾流; 旋转螺旋桨; 温度密度分层; 传热传质特性; 有限体积法; 红外探测

中图分类号: U661.1; TN215 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0107

Heat and mass transfer characteristics of submarine cold-thermal wake in the infrared detection

ZHANG Xu-sheng*, GUO Liang, HU Ri-cha, LIU Chun-long

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zxs1933@126.com

Abstract: The three-dimensional model of 1/72 LSII nuclear submarine was established using the finite volume method, and the simulation of high-speed rotating propeller and temperature-density stratified seawater were realized combining the frame motion, user defined functions and physical polynomial profile. Based on this model, the influences of factors such as high-speed rotating propeller, temperature-density stratified seawater and high-temperature thermal spray on the heat and mass transfer characteristics of submarine cold-thermal wake were discussed. The results indicate that high-speed rotating propeller induces the increase of backward delay distance of thermal wake and the decreases of sea surface temperature difference. Ignoring the rotation, absolute error and relative error of sea surface temperature difference is 3.23 mK and 52.7% respectively. Cold wake signal is formed by the rise of temperature-density stratified seawater which is disturbed by underwater navigation submarine. Compared with temperature-density uniform seawater, temperature-change area increases

收稿日期: 2016-03-20; 修订日期: 2016-05-07.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新基金资助项目(No. Y4CX1SS144); 中国科学院青年创新促进会基金资助项目(No. 2015173)

significantly and wake temperature difference rises from 6.13 mK to 84 mK. Existence of underwater navigation submarine can be judged by the cold wake characteristics in the upstream sea surface; if submarine exists, its position can be inversed precisely combining the thermal wake characteristics in the downstream sea surface. The above results can provide reference for optimizing the simulation accuracy of submarine cold-thermal wake.

Key words: thermal wake; rotating propeller; temperature-density stratification; heat and mass transfer characteristics; finite volume method; infrared detection

1 引言

随着减振降噪和高速深潜等潜艇关键技术的发展,仅采用直接声纳探测手段进行敌方潜艇的精确搜索与定位打击变得极其困难^[1,2]。目前,以直接声纳探测为主、间接非声探测为辅的联合式探测成为反潜技术发展的必然趋势。在间接非声探测领域,红外探测具有抗干扰能力强、全天候工作、快速实时成像、易于配合使用等优点^[3-6],适合进行长时间、大面积海域的全时监视,对于确定水下目标的方位、型号和动态参数具有重要意义^[7]。因此,基于间接红外探测的广域监视技术成为未来反潜技术的重要研究方向。

目前,部分学者已对潜艇冷热尾流的传热传质特性进行了相关研究,主要集中在浮升扩散规律和海表温度特性方面。江传富等^[2,8]采用试验方法验证了机载红外热尾流探潜的可行性,在有限探测距离内,高灵敏度红外成像系统能够捕获到潜艇热尾流的微弱海表温差信号。吴猛猛等^[9]研究了垂直温度分层海水中水下航行体热尾流自由表面的温度、密度和速度等参数的变化规律。陈伯义等^[10]探讨了温度均匀海水和温度分层海水中水下运动体冷热尾流浮升扩散规律及水面冷热特性的差异。研究表明,无论有无气泡作用,温度分层海水的水面冷尾流特征均更为显著。戴天奇等^[11]基于动网格技术仿真了二维潜艇热尾流的瞬时流动传热特性,该方法的计算精度要明显优于相对运动“排水法”。张昊春等^[12]建立了水下航行体热尾流的二维计算模型,分析了传输介质温度对热尾流形成、浮升及衰减等过程的影响。

综上所述,在仿真潜艇冷热尾流传热传质特性的过程中,各文献均存在以下简化或假设:(1)采用二维平面计算模型近似代替三维;(2)未考虑海水温度密度分层的影响;(3)忽略艇尾高速旋转螺旋桨的湍流扰动。鉴于上述原因,本文采用有限体积法建立了 1/72 龙鲨 II 号核潜艇的三维计算模型,结合动参考系、用户自定义函数和物性多项式函数等实现高速旋转螺旋桨和海水温度密度分层的仿真。基于该模型,探讨螺旋桨高速旋转、海水温度密度分层和高温热尾流喷射等因素对潜艇冷热尾流传热传质特性的影响,为进一步优化潜艇冷热尾流的数值仿真精度提供参考与借鉴。

2 物理模型及边界条件

2.1 物理模型

1/72 龙鲨 II 号核潜艇主要由艇体、指挥台围壳、侧翼、尾翼、螺旋桨、环形导流管、热尾流出口管等组成,如图 1 所示。艇长 $L \approx 866$ mm、艇体外径 $D_{\max} = 110$ mm、尾流出口管内径 $d = 7$ mm。对螺旋桨旋转区域进行四面体非结构化网格划分,螺旋桨表面网格如图 1 所示,结合动参考系(Frame Motion)实现高速旋转螺旋桨的湍流扰动仿真。

根据潜艇缩比模型的外轮廓尺寸和 DELL 工作站性能,确定了对称外流场计算域的总体尺寸。其中,潜艇轴向流域长度为 $12L$ 、水平流域宽度为 0.75 m、竖直流域深度为 1.0 m,如图 2 所示。即对称外流场计算域的长 \times 宽 \times 高分别为 10.392 m \times 0.75 m \times 1.0 m。

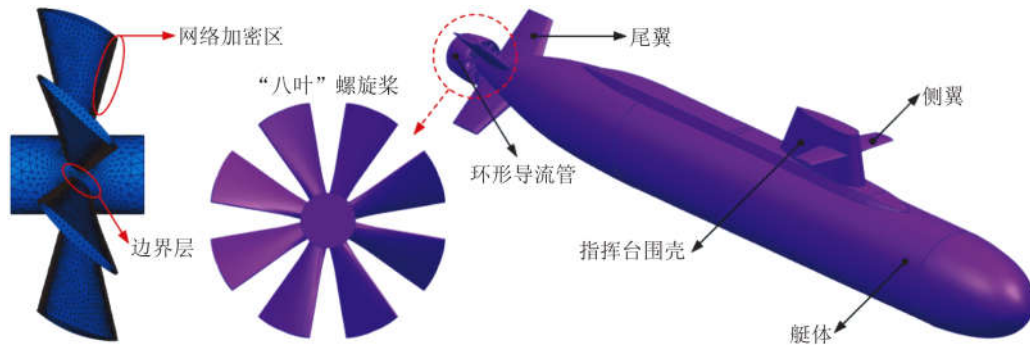


图 1 1/72 龙鲨 II 号核潜艇模型及网格

Fig. 1 Model and grid of 1/72 LSII nuclear submarine

2.2 边界条件

采用 SIMPLE 算法和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型求解三维对称外流场计算域的连续性方程、动量方程和能量方程。速度入口、出流、壁面、对称面、交界面等常规边界条件,如图 2 所示。为了逼近温度密度分层的真实海水物理属性,采用用户自定义

函数(User Defined Functions,UDF)实现海水温度随深度的负梯度变化,自由表面附近海水温度分布 $T(z)$ 为:

$$T(z) = 292.41665 + 0.1667z, \quad (1)$$

式中: z 为海水所在位置的深度坐标, m 取值为 $[-0.5m, 0.5m]$ 。

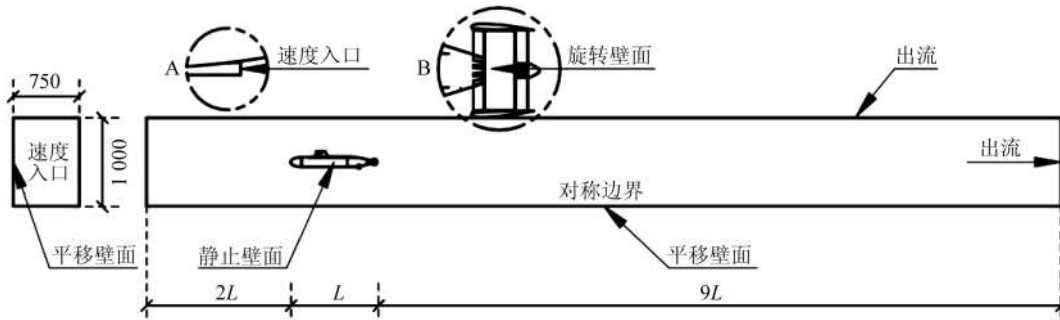


图 2 外流场计算域的边界条件及外形尺寸

Fig. 2 Boundary conditions and dimensions of external flow-field domain

结合物性多项式函数(Polynomial Profile)构建海水密度与温度的关系,自由表面附近海水密度近似为以海水温度为自变量的多项式函数 $\rho(t)$:

$$\rho(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 + ft^5, \quad (2)$$

式中: t 为摄氏度单位制下的海水温度。通过物性多项式函数实现海水密度分层属性时,须将温度单位换算为国际单位制—开尔文。将单位制转换关系代入式(2),经多项式展开与合并得出,海水密度多项式函数 $\rho(T)$ 为:

$$\rho(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5, \quad (3)$$

式中: T 为开尔文单位制下的海水温度,多项式函

数中各项系数如表 1 所示。

表 1 海水密度多项式函数的各项系数

Tab. 1 Polynomial function coefficients of seawater density

摄氏度单位制/ $^{\circ}\text{C}$		开尔文单位制/ K	
a	999.842594	A	-1.836246×10^4
b	6.793952×10^{-2}	B	3.072812×10^2
c	-9.095290×10^{-3}	C	-1.960851
d	1.001685×10^{-4}	D	6.289013×10^{-3}
e	-1.200830×10^{-6}	E	-1.012783×10^{-5}
f	6.536332×10^{-9}	F	6.536332×10^{-9}

3 分析与讨论

在潜艇冷热尾流传热传质特性的仿真过程中,主要涉及下潜深度 h 、航行速度 V_s 、螺旋桨转速 n_r 、热尾流喷速 V_h 和热尾流温度 T_h 等计算参数,选取数值如表 2 所示。为了进行影响因素的对比分析,温度密度均匀海水的物性参数与温度密度分层海水自由表面的物性参数相同,如表 3 所示。

表 2 仿真分析选取的计算参数

Tab. 2 Calculation parameters' selection of simulation analysis

下潜深度 h/m	航行速度 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	螺旋桨转速 $n_r/(r \cdot min^{-1})$	热尾流喷速 $V_h/(m \cdot s^{-1})$	热尾流温度 T_h/K
0.5	1.0	2 400	0.78	343

表 3 温度密度均匀海水的物性参数

Tab. 3 Physical parameters of temperature-density uniform seawater

温度 T/K	密度 $\rho/(kg/m^3)$	比热容 $c/(J/kg \cdot K)$	导热系数 $\lambda/(W/m \cdot K)$	动力粘度 $\mu/(Pa \cdot s)$
292.5	998.327	4 182	0.6	0.001 003

3.1 螺旋桨高速旋转

在温度密度均匀海水中,分析是否考虑螺旋桨高速旋转对热尾流传热传质特性的影响,如图 3 和图 4 所示。螺旋桨高速旋转能够促进高温热尾流与低温海水的相互掺混,加速热量和质量的扩散传递,提高热尾流核心区域的温度均匀性。同时,在螺旋桨与环形导流管的共同作用下,热尾流核心区域的温度有所降低、轴向速度分量明显增大,海面上呈现出热尾流后向延迟距离增大、海面温差减小等。

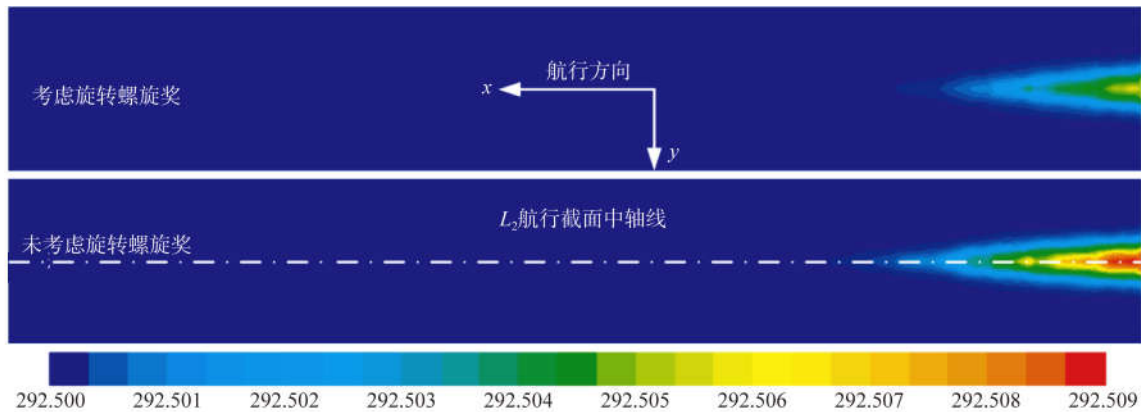


图 3 螺旋桨对海面热尾流温度特性的影响

Fig. 3 Effect of propeller on temperature characteristics of sea surface thermal wake

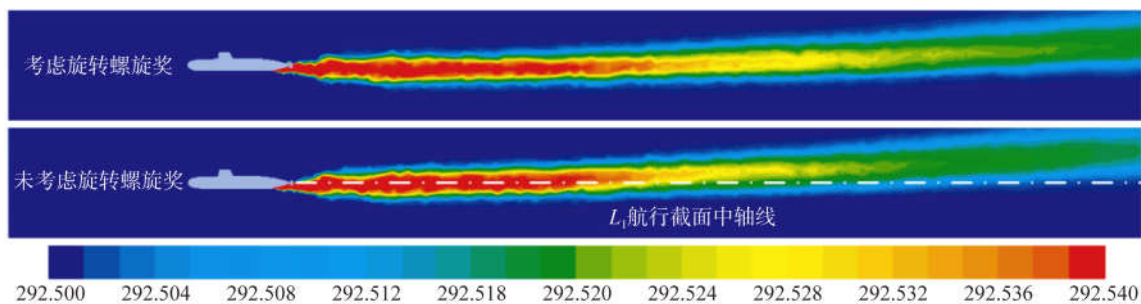


图 4 螺旋桨对航行截面热尾流温度特性的影响

Fig. 4 Effect of propeller on temperature characteristics of navigational section thermal wake

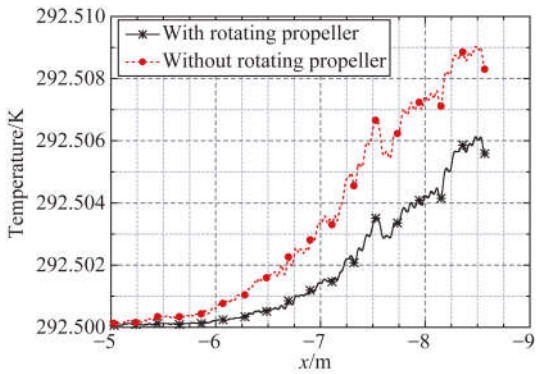


图 5 自由表面中轴线上的热尾流温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of thermal wake on the central axis of free surface

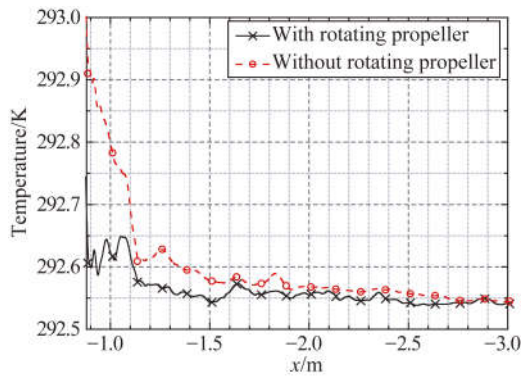


图 6 航行截面中轴线上的热尾流温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of thermal wake on the central axis of navigational section

图 5、图 6 所示为高速旋转螺旋桨对中轴线上热尾流温度分布的影响。其中, L_1 为自由表面上热尾流温度分布的影响。其中, L_1 为自由表面上中轴线, $x \in [-8.561 \text{ m}, 1.831 \text{ m}]$; L_2 为航行截面中轴线, $x \in [-8.561 \text{ m}, -0.766 \text{ m}]$ 。无论是自由表面上中轴线还是航行截面中轴线, 考虑螺旋桨高速旋转时对应位置的温度均有所降低, 忽略螺旋桨高速旋转引起海表温差的绝对误差和相对误差分别为 3.23 mK 和 52.7%。因此, 仿真潜艇热尾流传热传质特性必须考虑艇尾螺旋桨的高速旋转。

3.2 温度密度分层海水

考虑螺旋桨高速旋转时, 分析温度密度分层海水对冷热尾流传热传质特性的影响, 如图 7 和图 8 所示。水下航行潜艇扰动周围的低温海水, 促使艇体上侧海水浮升形成冷尾流温差信号, 冷尾流温差信号与热尾流温差信号叠加构成完整的海表尾流温度特性。在温度密度分层海水中, 海表温变区域显著增大、尾流温差由 6.13 mK 增大到 84 mK(红外辐射特性更为显著), 这对进行大面积、广阔海域的潜艇监视极为有利。

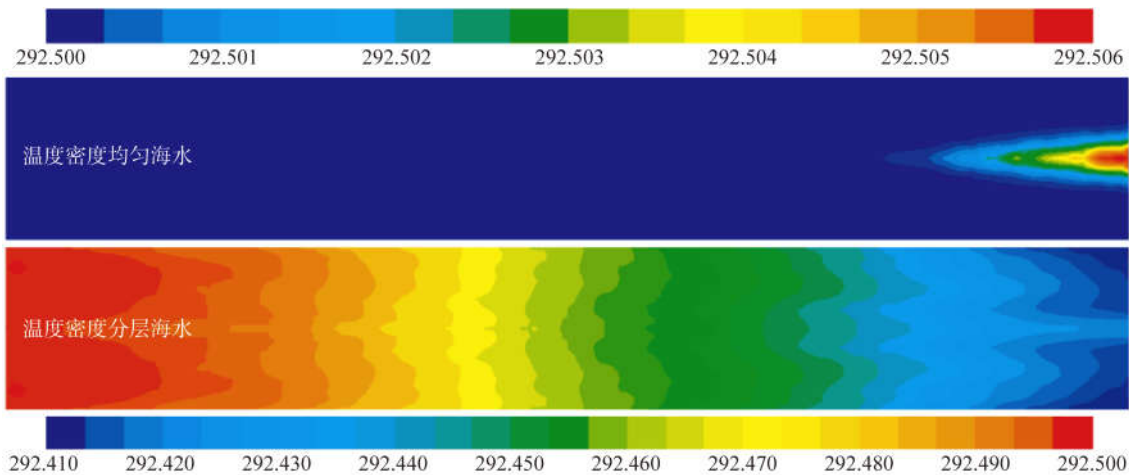


图 7 温度密度分层对海表尾流温度特性的影响

Fig. 7 Effect of stratified temperature-density on temperature characteristics of sea surface wake

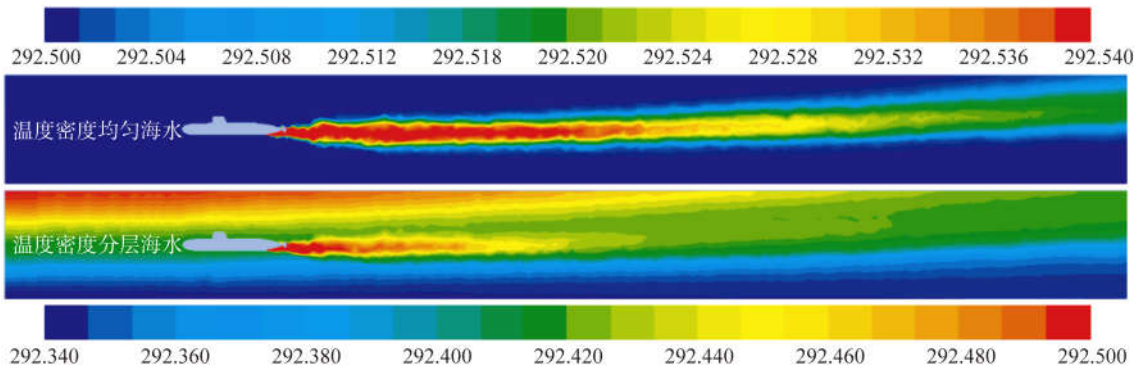


图 8 温度密度分层对航行截面尾流温度特性的影响

Fig. 8 Effect of stratified temperature-density on temperature characteristics of navigational section wake

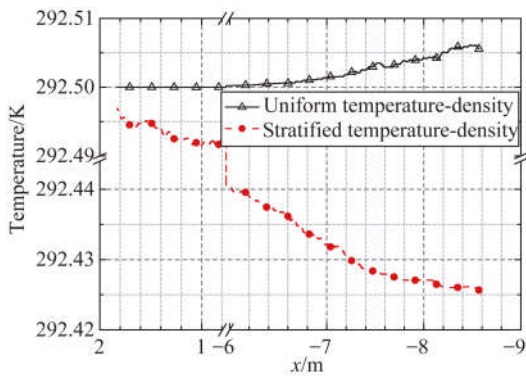


图 9 自由表面中轴线上的尾流温度分布

Fig. 9 Wake temperature distribution of free surface central axis

图 9 所示为温度密度分层海水对自由表面中轴线上尾流温度分布的影响。在温度密度均匀海水中,仅在海表下游的小面积海域内形成了扇形的热尾流温差信号;而在温度密度分层海水中,海表下游的大面积海域内均呈现出波浪式的冷尾流

温差信号,红外辐射特性远大于热尾流温差信号,即:海表温变趋势截然不同、红外辐射特性差异明显。因此,考虑海水温度密度分层是仿真潜艇冷尾流传热传质特性的必要条件。

3.3 高温热尾流喷射

与核动力潜艇相比,常规动力潜艇的冷却水用量和热尾流温度均明显下降^[5-6],此时可认为无热尾流喷射。考虑螺旋桨高速旋转和海水温度密度分层时,分析是否喷射高温热尾流对海表温度特性的影响,如图 10 所示。无论潜艇是否喷射高温热尾流,海表上游的温度场分布几乎不变,由于海表上游温度场是由水下航行潜艇扰动温度密度分层海水浮升形成的,与是否喷射热尾流无关;相反,海表下游才是热尾流作用的主要区域,高温热尾流的叠加导致海表下游同一位置处的温度升高、等温线形状突变。

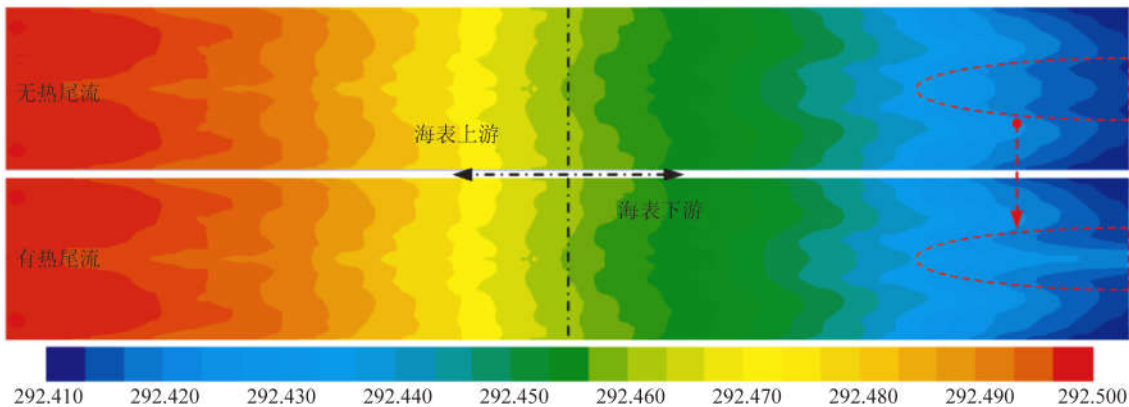


图 10 高温热尾流对海表温度特性的影响

Fig. 10 Effect of high temperature thermal wake on sea surface temperature characteristics

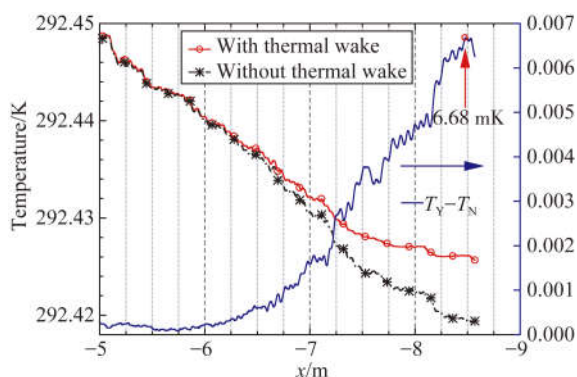


图11 自由表面中轴线上的尾流温度分布

Fig. 11 Wake temperature distribution on the central axis of free surface

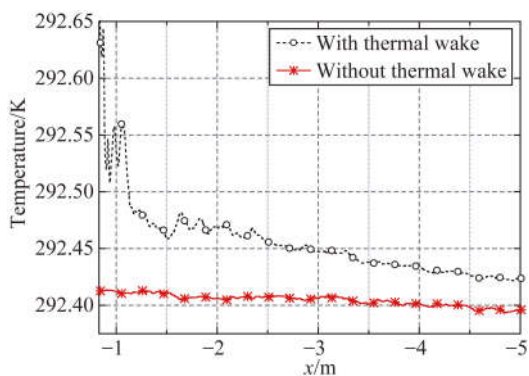


图12 航行截面中轴线上的尾流温度分布

Fig. 12 Wake temperature distribution on the central axis of navigational section

图11、图12所示为高温热尾流喷射对中轴线上尾流温度分布的影响。喷射高温热尾流过程等同于向低温海水“增容加质”过程,故航行截面中轴线上的尾流温度有所增大;在海表下游热尾流作用区域,高温热尾流热容量削弱了温度密度

分层海水的冷尾流温差信号、尾流温升达到6.68 mK。因此,在温度密度分层海水中,通过海表上游冷尾流特征判断是否存在水下航行潜艇;若存在,再结合海表下游热尾流特征实现潜艇位置的精确反演。

4 结论

本文采用有限体积法建立了1/72龙鲨II号核潜艇的三维计算模型,结合动参考系、用户自定义函数和物性多项式函数等实现了高速旋转螺旋桨和海水温度密度分层的仿真。基于该模型,探讨了螺旋桨高速旋转、海水温度密度分层和高温热尾流喷射等因素对潜艇冷热尾流传热传质特性的影响,所得结论如下:螺旋桨高速旋转能够促进高温热尾流与低温海水的相互掺混,提高热尾流核心区域的温度均匀性,呈现出热尾流后向延迟距离增大、海表温差减小等特征,忽略旋转时海表温差的绝对误差和相对误差分别为3.23 mK和52.7%;水下航行潜艇扰动温度密度分层海水浮升形成冷尾流温差信号,其与热尾流温差信号叠加构成完整的海表尾流温度特性。与温度密度均匀海水相比,海表温变区域显著增大、尾流温差由6.13 mK增大到84 mK;海表上游温度场是由水下航行潜艇扰动温度密度分层海水浮升形成的,海表下游温度场是冷尾流温差信号和热尾流温差信号叠加形成的。通过海表上游冷尾流特征判断是否存在水下航行潜艇,若存在,再结合海表下游热尾流特征实现潜艇位置的精确反演。

参考文献:

- [1] 崔国恒,于德新.非声探测技术现状及其对抗措施[J].火力与指挥控制,2007,32(12):10-13.
CUI G H, YU D X. Status of non-acoustics antisubmarine detecting technology and its countermeasures [J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32 (12):10-13. (in Chinese)
- [2] 杨日杰,蒋志忠,陈建勇,等.航空搜潜研究综述[J].海军航空工程学院学报,2010,25(5):552-558.
YANG R J, JIANG ZH ZH, CHEN J Y, et al. A

survey of aviation searching submarine [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(5):552-558. (in Chinese)

- [3] 陈圣涛,刘焕英,齐异.潜艇热尾流在海洋环境中的传质传热特性研究[C].中国造船工程学会优秀学术论文文集,2010.

CHEN SH T, LIU H Y, QI Y. Research on the heat and mass transfer characteristics of submarine thermal wake in marine environment [C]. *The Conference Proceedings of Chinese Shipbuilding Project Learns*, 2010. (in Chinese)

- [4] 蒋志忠, 杨日杰, 李德鑫, 等. 机载红外探测仪检查搜潜建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 390-396.
JIANG ZH ZH, YANG R J, LI D X, *et al.*. Modeling and simulation for checking search submarine by airborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 390-396. (in Chinese)
- [5] CHEN SH T, ZHONG J J, SUN P. Numerical simulation and experimental study of the submarine's cold wake temperature character [J]. *Journal of Thermal Science*, 2014, 23(3): 253-258.
- [6] 王建勋, 邓海华, 孙国仓. 针对遥感探潜的潜艇红外隐身技术评价方法[J]. 船舶电子工程, 2015, 35(10): 176-181.
WANG J X, DENG H H, SUN G C. Efficiency evaluation system for infrared stealth according to remote sensing detection of submarine [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, 35(10): 176-181. (in Chinese)
- [7] 师于杰, 任海刚. 国外非声探潜与隐身技术发展趋势[J]. 船舶电子工程, 2015, 35(1): 5-9.
SHI Y J, REN H G. Trends of foreign non-acoustics exploration potential and stealth technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, 35(1): 5-9. (in Chinese)
- [8] 江传富, 杨坤涛, 王江安, 等. 机载红外热像探潜技术[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 90-92.
JIANG CH F, YANG K T, WANG J A, *et al.*. Detection of submarine by airborne IR imaging system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2006, 34(7): 90-92. (in Chinese)
- [9] 吴猛猛, 陈伯义, 张修峰, 等. 温度分层海洋中水下航行体引起水面特征参数变化规律的研究[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 242-246.
WU M M, CHEN B Y, ZHANG X F, *et al.*. Study on the varied laws of surface feature parameters caused by a going body underwater in the temperature stratification ocean [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(4): 242-246. (in Chinese)
- [10] 陈伯义, 雷渡民, 吴猛猛, 等. 水下运动体尾流的浮升规律及其水面冷热特征的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1140-1146.
CHEN B Y, LEI D M, WU M M, *et al.*. Numerical simulation on the buoyant laws and the cold-thermal surface features of the wake behind a moving underwater body [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1140-1146. (in Chinese)
- [11] 戴天奇, 姚世卫, 魏志国. 基于动网格技术的潜艇热尾流浮升规律研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(5): 86-89.
DAI T Q, YAO SH W, WEI ZH G. Numerical simulation of thermal wake buoyant law based on dynamic meshing technique [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(5): 86-89. (in Chinese)
- [12] 张昊春, 吉宇, 马锐, 等. 水下航行体热尾流浮升特性研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(7): 24-28.
ZHANG H CH, JI Y, MA R, *et al.*. Buoyant characteristics of thermal wakes discharged by underwater vehicles [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(7): 24-28. (in Chinese)

作者简介:



张旭升(1988—),男,黑龙江讷河人,硕士,助理研究员。2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事红外热辐射传输、航天器热控技术等方面研究。E-mail: zxs1933@126.com



郭亮(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员。2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事传热传质学、空间机构环境适应性、空间光学遥感器热控技术等方面研究。E-mail: guoliang329@hotmail.com