

# 潜艇热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性

张旭升，郭亮，胡日查，常雯娟

(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:**选取1/72龙鲨II号核潜艇为研究对象,采用有限体积法建立外流域的三维计算模型,运用动参考系实现尾部螺旋桨高速旋转的仿真。基于该模型,评估下潜深度、航行速度、热尾流喷速、热尾流温度等因素对热尾流浮升扩散规律及海表温度特性的影响。研究表明:1)随着下潜深度和航行速度的增大,海表温度特性的后向延迟距离增大、海表温差减小;2)随着热尾流喷速和热尾流温度的增大,海表温度特性的后向延迟距离减小、海表温差增大;3)增大高温热尾流热容量或减小低温海水热容量均能促使海表温度特性趋于明显。本文结论可为某型号潜艇的红外探测与反演定位提供针对性的参考与借鉴。

**关键词:**热尾流;浮升扩散规律;海表温度特性;有限体积法;红外探测

中图分类号: U661.1, TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)08-0678-05

## Buoyancy Diffusion Law and Ocean-surface Temperature Characteristic of Submarine Thermal Wake

ZHANG Xusheng, GUO Liang, HU Richa, CHANG Wenjuan

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

**Abstract:** 1/72 LS II nuclear submarine is selected as the research object, three-dimensional numerical model of external flow-field is established by using the finite volume method, and high-speed rotation of tail-propeller is simulated by motion frame. Based on the model, factors which affect the buoyancy diffusion law and ocean-surface temperature characteristic, such as diving depth, sailing velocity, and thermal wake velocity/temperature are evaluated. Research shows that 1) with the diving depth and sailing velocity increasing, backward delay distance increases and temperature difference decreases towards ocean-surface temperature characteristic; 2) with the thermal wake velocity/temperature increasing, backward delay distance decreases and temperature difference increases towards ocean-surface temperature characteristic; 3) increasing the heat capacity of high-temperature thermal wake or decreasing the heat capacity of low-temperate seawater makes the ocean-surface temperature characteristic more obvious. The conclusion could provide the targeted reference for infrared detection and inverse positioning of certain type submarine.

**Key words:** thermal wake, buoyancy diffusion law, ocean-surface temperature characteristic, finite volume method, infrared detection

## 0 引言

在现代化海战中,潜艇承担着隐蔽、侦查、突袭敌方海上作战单元的重要角色,是具有“航母猎手”称号的关键战略性武器,因此世界各国已着重开展潜艇与反潜技术的研究。依据探测原理不同,反潜方式可分为声纳探测<sup>[1-2]</sup>、可见光探测<sup>[3-4]</sup>、红外探测<sup>[5-7]</sup>、电磁探测<sup>[4,7]</sup>等。随着机械制造精度与消磁降噪技术的

进步,以声纳探测为主、非声探测为辅的联合式探测将成为反潜技术发展的必然趋势<sup>[5]</sup>。在非声探测领域,红外探测具有全天候工作、抗干扰能力强、快速实时成像、易于配合使用等特点<sup>[6-7]</sup>,是未来反潜技术的重要研究方向。

张健等<sup>[8-9]</sup>搭建了拖行水下航行器的热尾流温度测量系统,获得了温度分层水池中热尾流的温度分布规律及主次影响因素。吴猛猛等<sup>[10-11]</sup>基于上述热尾流

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-06-05。

作者简介: 张旭升(1988-),男,工学硕士,助理研究员,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。  
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(Y4CX1SS144)。

温度测试系统,通过实验仿真相结合的方式研究了椭圆体热尾流浮升-掺混-衰减全过程的浮升扩散规律和水面温度特征。陈伯义等<sup>[12]</sup>探讨了海水的垂直温度分布和有无气泡等因素对潜艇热尾流的浮升扩散轨迹和水面冷热特征的影响。Chen 等<sup>[13-14]</sup>开展了水下航行体冷/热尾流浮升轨迹及表面温差信号的研究,实现了仿真计算结果与红外相机实测数据的基本一致。张昊春等<sup>[15]</sup>建立了简化水下航行体热尾流的二维计算模型,分析了热尾流的浮升轨迹和温度衰减等规律。戴天奇等<sup>[16]</sup>基于动网格技术建立了潜艇热尾流的二维计算模型。该方法能够更加全面、准确地捕获热尾流流动-传热过程的瞬变特征。

不难发现,上述各文献在热尾流浮升扩散规律及海表温度特性的研究过程中存在如下简化:1)受计算资源与计算效率的限制,采用二维仿真计算近似代替三维;2)采用椭圆体等简化几何模型代替流线型潜艇,忽略艇体轮廓对外流场的影响;3)未考虑潜艇尾部螺旋桨的高速旋转,造成外流场湍流扰动项不完备。鉴于上述原因,本文选取1/72龙鲨II号核潜艇为研究对象,采用有限体积法建立外流域的三维计算模型,运用动参考系实现尾部螺旋桨高速旋转的仿真。基于该模型,评估下潜深度、航行速度、热尾流喷速、热尾流温度等因素对热尾流浮升扩散规律及海表温度特性的影响,为某型号潜艇的红外探测与反演定位提供针对性的参考与借鉴。

## 1 物理模型及边界条件

### 1.1 物理模型

综合对比国内外几种典型核潜艇缩比模型的几何结构特征和动力性能参数,选取自航式龙鲨II号核潜艇缩比模型作为仿真分析和实验研究的对象。该模

型主要由艇体、指挥台围壳及侧翼、尾翼、螺旋桨及环状导管、热尾流出口管等结构组成,如图1所示。长度 $L=866\text{ mm}$ ,最大直径 $D_{\max}=110\text{ mm}$ ,热尾流出口管内径 $d=7\text{ mm}$ ,与原模型的尺寸比例为1:72。通过控制侧翼、尾翼姿态和螺旋桨转速与方向,实现潜艇模型航行方向与速度的调节。

依据潜艇缩比模型的几何特征尺寸和具体实验条件,确定外流场计算域的几何尺寸。其中,潜艇前端流域长度 $2L$ ,潜艇后端流域长度 $9L$ ,计算域总长度 $12L$ ;潜艇两侧流域宽度0.75 m,计算域总宽度1.5 m;基准下潜深度下,潜艇中轴线距自由表面高度0.5 m,计算域总高度1.0 m。即:外流场计算域的长×宽×高分别为10.392 m×1.5 m×1.0 m,如图2所示。

基于外流场计算域的对称性,以1/2计算域为研究对象进行计算流体动力学分析是合理、准确且高效的。同时,将螺旋桨周围的圆柱形流域单独分离出来,由于其结构相对复杂且与整体流域尺寸相差较大,故采用较为强健的Meshing模块划分螺旋桨计算域的三维非结构网格,如图3所示,再结合动参考系即可实现尾部高速旋转螺旋桨强湍流扰动的仿真。

### 1.2 边界条件

边界条件是获得计算域流场变量唯一解的必要条件。1/2计算域外表面的边界条件如图4所示,包括:速度入口、出口流动等进出口条件,静止墙面、平移墙面、旋转墙面、对称面、交界面等墙面条件,潜艇计算域、螺旋桨计算域等单元分区。在动参考系中设置旋转轴、旋转方向和绝对转速等,以仿真潜艇尾部高速旋转螺旋桨引起的强湍流扰动。文中采用SIMPLE算法和RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型求解粘性流体的三维Navier-Stokes方程。

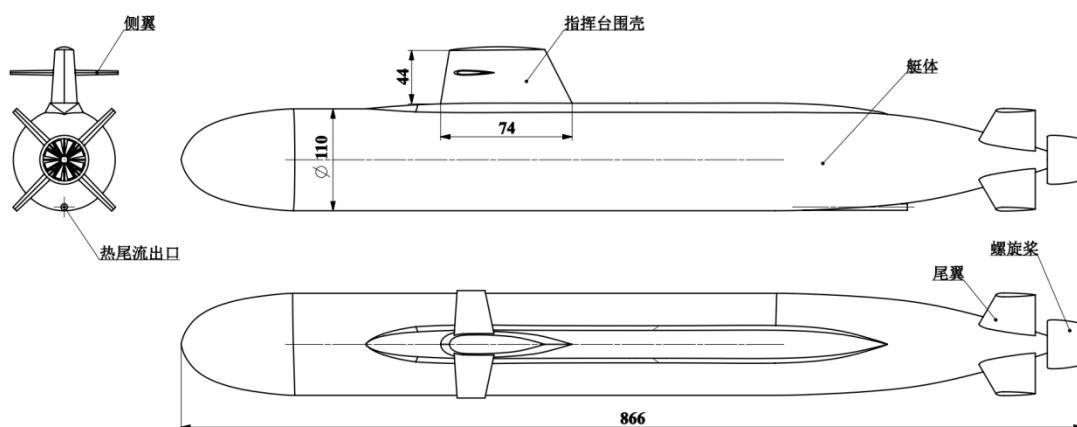


图1 龙鲨II号核潜艇缩比模型二维视图

Fig.1 Two-dimensional view of LSII nuclear submarine scale model

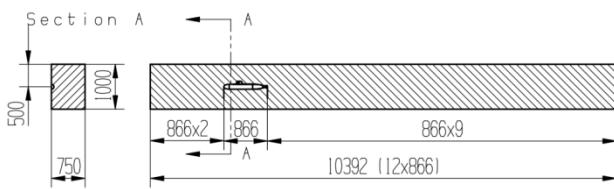


图2 潜艇缩比模型的外流场计算域

Fig.2 External flow-field computational domain of submarine scale model

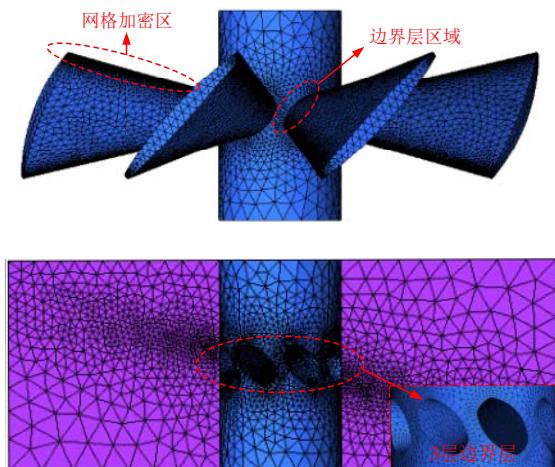


图3 螺旋桨计算域表面的网格划分

Fig.3 Grid division of propeller computational domain surface

## 2 分析与讨论

结合龙鲨Ⅱ号核潜艇缩比模型的动力性能参数, 规划了分析热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性的计算工况, 如表1所示。其中, 涉及参数包括: 下潜深度 $h$ 、航行速度 $V_s$ 、热尾流喷速 $V_h$ 和热尾流温度

$T_h$ , 标注星号(\*)的参数为基准参数, 所有基准参数共同组成基准工况。

### 2.1 下潜深度

在基准参数条件下, 分析下潜深度 $h$ 对热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性的影响。图5中给出1/2计算域对称截面的热尾流温度分布, 显而易见, 随着下潜深度 $h$ 的增大, 潜艇上侧低温海水的热容量增大, 造成热尾流浮升扩散的中心高温区域缩小, 进而严重削弱海洋表面热尾流的红外辐射特性。图6中给出海洋表面的热尾流温度分布, 在基准工况下, 热尾流呈现海表温度特性的后向延迟距离为6.52 m、海表温差为8 mK; 而当 $h=0.3$  m时, 海表温度特性的后向延迟距离仅为4.38 m、比基准工况超前32.8%, 海表温差达到20 mK。即: 随着下潜深度 $h$ 的增大, 海表温度特性的后向延迟距离增大、海表温差减小, 不利于实现敌方潜艇的红外探测与反演定位。

### 2.2 航行速度

在基准参数条件下, 分析航行速度 $V_s$ 对热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性的影响。分析图7和图8得出, 随着航行速度 $V_s$ 和螺旋桨转速 $n_r$ 的增大, 热尾流浮升扩散的中心高温区域逐渐缩小, 主要由于尾部螺旋桨的高速旋转促进了高温热尾流与临近低温海水的掺混和区域温度均匀化。因此, 需要考虑螺旋桨高速旋转的强湍流扰动项对热尾流特性的影响。同时, 海表温度特性的后向延迟距离略有增大、海表温差减小。当 $V_s=2.0$  m/s时, 海表温度特性的后向延迟距离增大为6.60 m、比基准工况延后1.2%, 海表温差减小为6 mK。

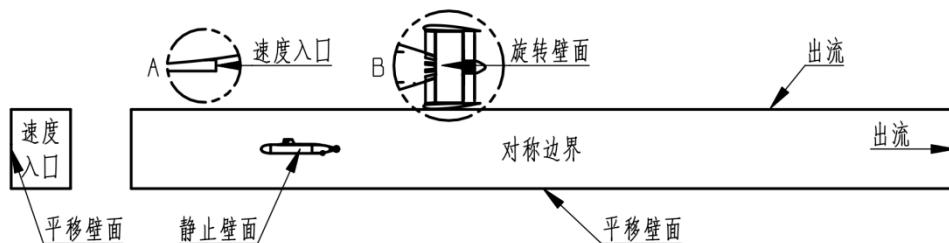


图4 潜艇缩比模型1/2计算域的边界条件

Fig.4 Boundary conditions of submarine scale model's 1/2 computational domain

表1 仿真分析的计算工况

Table 1 Calculation cases of simulation analysis

下潜深度 $h/m$	航行速度 $V_s$ /(m/s) [螺旋桨转速 $n_r$ /(r/min)]	热尾流喷速 $V_h$ /(m/s)	热尾流温度 $T_h$ /°C
0.3	1.0[2400]*	0.26	90
0.5*	1.5[2700]	0.78*	70*
0.7	2.0[3000]	1.30	50

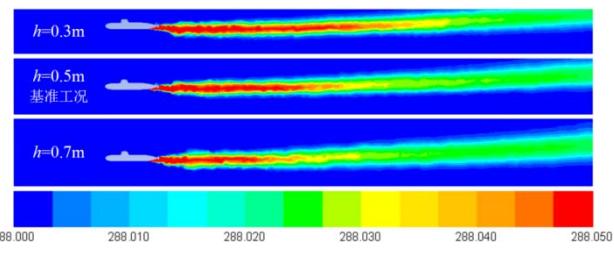


图5 下潜深度对热尾流浮升扩散规律的影响

Fig.5 Effect of diving depth on the buoyancy diffusion law

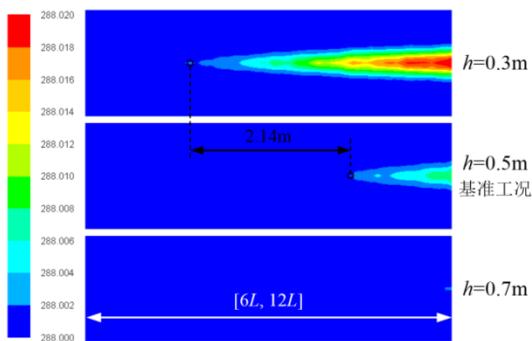


图 6 下潜深度对热尾流海表温度特性的影响

Fig.6 Effect of diving depth on the ocean-surface temperature characteristic

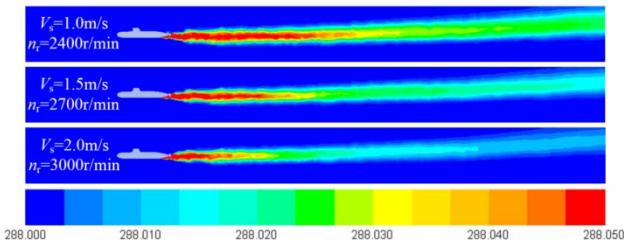


图 7 航行速度对热尾流浮升扩散规律的影响

Fig.7 Effect of sailing velocity on the buoyancy diffusion law

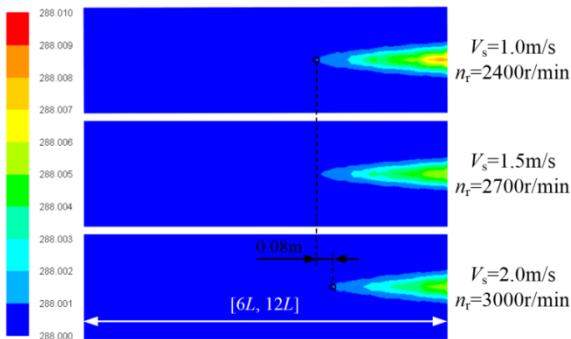


图 8 航行速度对热尾流海表温度特性的影响

Fig.8 Effect of sailing velocity on the ocean-surface temperature Characteristic

### 2.3 热尾流喷速

在基准参数条件下,分析热尾流喷速  $V_h$  对热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性的影响。分析图 9 和图 10 得出,随着热尾流喷速  $V_h$  的增大,热尾流浮升扩散的中心高温区域急剧增大,海表温度特性的后向延迟距离减小、海表温差增大。在  $V_h=1.3 \text{ m/s}$  时,热尾流呈现海表温度特性的后向延迟距离为 5.79 m,比基准工况超前 11.2%,海表温差增大为 12 mK。

### 2.4 热尾流温度

在基准参数条件下,分析热尾流温度  $T_h$  对热尾流的浮升扩散规律及海表温度特性的影响。分析图 11 和图 12 所示,随着热尾流温度  $T_h$  的增大,热尾流浮升扩散的中心高温区域增大,海表温度特性的后向延

迟距离减小、海表温差增大。在  $T_h=90^\circ\text{C}$  时,热尾流呈现海表温度特性的后向延迟距离为 6.26 m,比基准工况超前 4.0%,海表温差增大为 10 mK。

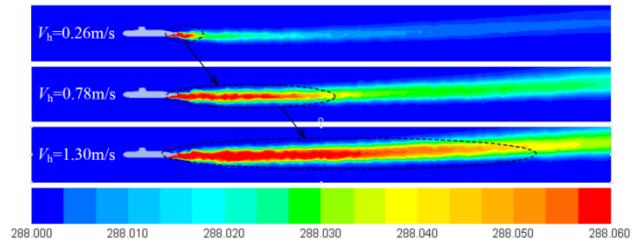


图 9 热尾流喷速对热尾流浮升扩散规律的影响

Fig.9 Effect of thermal wake velocity on the buoyancy diffusion law

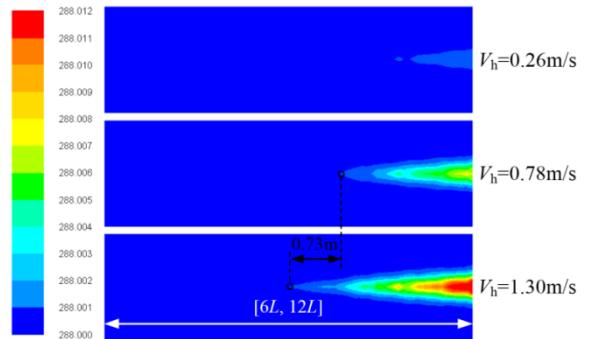


图 10 热尾流喷速对热尾流海表温度特性的影响

Fig.10 Effect of thermal wake velocity on the ocean-surface temperature characteristic

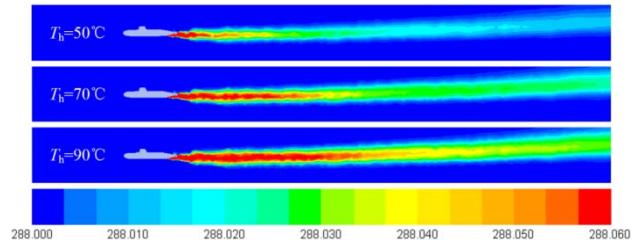


图 11 热尾流温度对热尾流浮升扩散规律的影响

Fig.11 Effect of thermal wake temperature on the buoyancy diffusion law

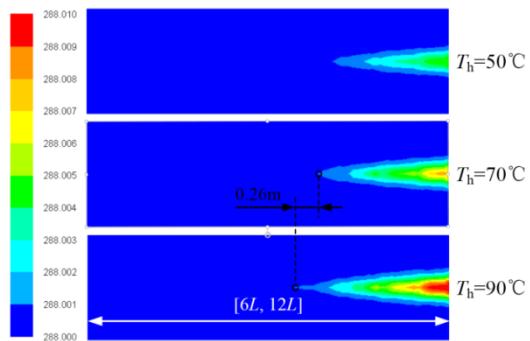


图 12 热尾流温度对热尾流海表温度特性的影响

Fig.12 Effect of thermal wake temperature on the ocean-surface temperature characteristic

综上所述,下潜深度 $h$ 和航行速度 $V_s$ 对热尾流特性的影响趋势相同,均增加了潜艇外流场低温海水的热容量,但下潜深度的影响效果更为强烈;热尾流喷速 $V_h$ 和热尾流温度 $T_h$ 对热尾流特性的影响趋势相同、影响效果相当,均增加了潜艇排放高温热尾流的热容量。

### 3 结论

本文采用有限体积法建立1/72龙鲨Ⅱ号核潜艇外流域的三维计算模型,运用动参考系实现尾部螺旋桨高速旋转的仿真。基于该模型,评估下潜深度、航行速度、热尾流喷速、热尾流温度等因素对热尾流浮升扩散规律及海表温度特性的影响,所得结论如下:

1) 下潜深度 $h$ 和航行速度 $V_s$ 对热尾流特性的影响趋势相同,但下潜深度 $h$ 的影响效果更为强烈。随着某一参数的增大,热尾流浮升扩散的中心高温区域缩小,海表温度特性的后向延迟距离增大、海表温差减小。

2) 热尾流喷速 $V_h$ 和热尾流温度 $T_h$ 对热尾流特性的影响趋势相同、影响效果相当。随着某一参数的增大,热尾流浮升扩散的中心高温区域增大,海表温度特性的后向延迟距离减小、海表温差增大。

3) 增大高温热尾流热容量或减小低温海水热容量均能促使海表温度特性趋于明显,更有利于实现敌方潜艇的红外探测与反演定位。

### 参考文献:

- [1] 张士成,杨桢,杨立,等.水下航行体自由表面波浪尾迹红外特征及探测[J].红外与激光工程,2012,41(10): 2615-2620.  
ZHANG Shicheng, YANG Zhen, YANG Li, et al. Infrared characterization and detection of free surface wave wake of underwater vehicle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2615-2620.
- [2] 王江安,韦文涛,李晓龙,等.水下航行体热尾流特性的技术融合[J].舰船科学技术,2011,33(12): 9-13.  
WANG Jiangan, WEI Wentao, LI Xiaolong, et al. Research on characteristics of underwater vehicles' thermal wake by technology convergence[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(12): 9-13.
- [3] FU Huiping, WAN Pengcheng. Numerical simulation on ship bubbly wake[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2011, 10: 413-418.
- [4] 朱海荣,朱海,刘金涛,等.水下航行器光学隐蔽深度测量系统[J].光学精密工程,2015,23(10): 2778-2784.  
ZHU Hairong, ZHU Hai, LIU Jintao, et al. Measurement system of optical concealment depth of underwater vehicle[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2778-2784.
- [5] 王建勋,孙国仓,邓海华,等.热尾流红外探测作用距离工程估算方法[J].舰船科学技术,2015,37(4): 107-111.  
WANG Jianxun, SUN Guocang, DENG Haihua, et al. Engineering evaluation method for detection distance of submarine thermal wake by IR[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(4): 107-111.
- [6] 蒋忠志,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 Zhizhong, YANG Rijie, LI Dexin, et al. Modeling and simulation for checking search submarine by airborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 390-396.
- [7] 王建华,赵浩淞.机载红外探潜系统综述[J].激光与红外,2013,43(6): 599-603.  
WANG Jianhua, ZHAO Haosong. Survey of airborned infrared system for submarine detection[J]. *Lasers & Infrared*, 2013, 43(6): 599-603.
- [8] 张健,杨立,袁江涛,等.水下航行器热尾流试验研究[J].实验流体力学,2008,22(3): 7-13.  
ZHANG Jian, YANG Li, YUAN Jiantao, et al. Experimental research of underwater vehicle thermal wakes[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(3): 7-13.
- [9] 张健,陈翩,杨立,等.水下航行器排放冷却水温度分布特性研究[J].船舶力学,2009,13(4): 533-539.  
ZHANG Jian, CHEN Xuan, YANG Li, et al. Study of temperature characteristic of cooling water discharged by underwater vehicle[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(4): 533-539.
- [10] 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 Mengmeng, CHEN Boyi, ZHANG Xiufeng, 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.
- [11] 吴猛猛,龚文超,袁宝吉.水下航行体热尾流水面温度特征的研究[J].红外,2011,32(9): 29-34.  
WU Mengmeng, GONG Wencho, YUAN Baoji. Study of surface temperature features of thermal wake caused by underwater vehicle[J]. *Infrared*, 2011, 32(9): 29-34.
- [12] 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 Boyi, LEI Dumin, WU Mengmeng, 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.
- [13] CHEN Shengtao, LIU Huanying, QI Yi. The thermal character of the underwater heat exhausting source[J]. *Journal of Thermal Science*, 2010, 19(5): 445-450.
- [14] CHEN Shengtao, ZHONG Jingjun, SUN Peng. Numerical simulation and experimental study of the submarine's cold wake temperature character[J]. *Journal of Thermal Science*, 2014, 23(3): 253-258.
- [15] 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 Haochun, JI Yu, MA Rui, et al. Buoyant characteristics of thermal wakes discharged by underwater vehicles[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(7): 24-28.
- [16] 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 Tianqi, YAO Shiwei, WEI Zhiguo. Numerical simulation of thermal wake buoyant law based on dynamic meshing technique[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(5): 86-89.