

# 分层流中潜艇尾迹特征的数值模拟及识别

陈二云<sup>1\*</sup>, 刘兴生<sup>1</sup>, 马振来<sup>2</sup>, 赵鑫鑫<sup>2</sup>, 李国平<sup>2</sup>, 杨爱玲<sup>1,3</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031;

3. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

**摘要:**水动力尾迹是潜艇非声学探测的重要物理场之一。鉴于复杂的海洋环境,水动力尾迹的准确预测具有较大困难。采用多相流(VOF)方法对直航条件下潜艇分层流场进行数值模拟,获得航速、相对潜深和海水分层等因素对自由表面尾迹特征及内波尾迹特征的影响规律。采用 Canny 边缘检测理论提取尾迹轮廓特征,测量尾迹角和横波张角。结果表明:潜艇在相对潜深较大且弗劳德数( $Fr$ )较低条件下,自由表面尾迹并不呈现典型“V”形波;随着 $Fr$ 数的增加,尾迹形态逐渐由“斑”状演变为平行波,最终呈现明显的“V”形波。海水密度分层的增强会加剧自由表面的扰动,使自由表面尾迹特征更加突出。研究结果可为潜艇水动力尾迹特征的图像识别提供参考依据。

**关键词:**自由表面尾迹;内波;分层流;多相流;Canny

中图分类号:U661.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.008

## Numerical simulation and identification of submarine wake characteristics in stratified flow

CHEN Eryun<sup>1\*</sup>, LIU Xingsheng<sup>1</sup>, MA Zhenlai<sup>2</sup>, ZHAO Xinxin<sup>2</sup>, LI Guoping<sup>2</sup>, YANG Ailing<sup>1,3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Shipbuilding Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China;

3. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Hydrodynamic wake is one of the important physical fields for the non-acoustic detection of submarines, and its accurate prediction is difficult due to the complexity of the marine environment. The Volume of Fluid (VOF) method is used to numerically simulate the stratified flow field of a submarine under direct navigation, and the influence laws of the speed, dive depth, and seawater stratification on the free-surface wake features and internal-wave wake features are obtained. Canny edge detection operator theory is applied to extract the wake profile features, and the wake angle and transverse wave tensor angle are measured. The results show that the submarine's wake does not present a typical “V” wave when the  $Fr$  number is low at a large dive depth, but gradually changes from a “spot” to a parallel wave with the increase of the  $Fr$  number, and eventually evolves into a distinct “V” wave. The strong stratification of seawater enhances free-surface perturbation, making the free-surface wake characteristics more pronounced. These results provide a basis for image recognition of hydrodynamic wake characteristics of submarines.

**Key words:** free surface trailing; internal wave; stratified flow; VOF; Canny

随着潜艇减振降噪和消声隐身(消声瓦和新型涂层技术)技术的不断成熟与进步,对非声探测技

术的需求迫在眉睫<sup>[1]</sup>。非声探测的方法有很多种,主要包括水动力尾迹、电磁、雷达、光学、红外和生物

收稿日期:2025-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51106099)资助

作者简介:陈二云(1977—),男,教授,博士,研究方向为计算流体力学。\*通信作者:cheneryun@usst.edu.cn

引用格式:陈二云,刘兴生,马振来,等. 分层流中潜艇尾迹特征的数值模拟及识别[J]. 中国航海,2026,49(1):78-88.

CHEN E Y, LIU X S, MA Z L, et al. Numerical simulation and identification of submarine wake characteristics in stratified flow[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 78-88. (in Chinese)

探测等多种方式<sup>[2]</sup>。在这些物理场中,潜艇的水动力尾迹最难被隐藏,往往可延绵 20 km,因此成为非声探测与识别的重要物理场。

目前,关于潜艇水动力尾迹特征的研究还处在发展阶段。文献[3]提出船行波 KELVIN 尾迹,即船在行驶的过程中会在船后方形成由横波和散波共同组成的“V”形亮带。船行波具有极强的规律性,在海面上无规则的波浪中具有较强的识别性。当潜艇在近水面航行时同样会在自由液面出现类似 KELVIN 尾迹,其产生的自由液面尾迹可反映出潜艇自身的信息,因此研究潜艇自由表面尾迹特征具有重大意义。当潜艇为减少对自由液面的影响时,就需在潜深较大的情况下航行。面对潜艇在潜深较大的航行工况下继续对潜艇进行非声探测,就需要研究潜艇引起的内波特征。内波是 Fridtjof Nansen 在西伯利亚通过融化的冰川中,发现船被神秘力量减速,几乎无法操控,后经研究发现这是盐水和淡水层之间的界面,在水下形成的波与船相互作用而产生阻力,此即海水分层导致的“Dead water”现象。DALL<sup>[4]</sup>通过试验验证淡水和盐水的交界面会产生波浪,该现象就是内波。在海洋中,因为海水分层现象的存在,潜艇在潜深较大之后会引起内波,所以可通过内波特征对深海中的潜艇进行探测。目前,潜艇水动力尾迹的研究受到国内外学者的广泛重视,潜艇水动力尾迹的研究,在未来非声探测领域有重要的学术和工程研究意义。

文献[5]~文献[7]忽略海水的密度分层,研究不同相对潜深(潜深和潜艇艇长之比)和  $Fr$ (惯性力和黏性力之比)对水动力尾迹的影响规律。结果表明:当相对潜深为 0.98,  $Fr$  小于 0.40 时,尾迹主要由横波组成;当潜深与艇长之比为 0.13 时,尾迹角小于  $19.47^\circ$ ,  $Fr=0.35$  时,尾迹角可减少到  $13.88^\circ$ 。

在海洋不同的深度,由于盐度差异导致海水密度不同。当潜艇在密度层化流中航行时,海水中的流体微团受到扰动偏离其平衡位置进而形成内波尾迹<sup>[8-9]</sup>。

牛明昌<sup>[10]</sup>在潜深为 28% 艇长且混合分层条件下,采用 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes)方法研究密度跃层中潜艇航速和密度梯度的变化对自由表面尾迹的影响。研究结果表明自由液面会产生类似 KELVIN 波,混合分层中密度变化对自由液面尾迹的影响最小,波长和辐散强度并没有随密度的变化而变化。

马卫状<sup>[11]</sup>在海水密度混合分层条件下,重点研究潜艇在密度跃层上、中、下等 3 个不同位置处,对

自由液面的尾迹特征影响规律,结果表明潜艇在密度跃层下方波长会增加,而波形的角度没有变化。

文献[12]和文献[13]采用数值方法研究海水密度连续分层对自由液面尾迹特征的影响。相关研究工作表明,海水密度分层会加强自由液面尾迹的传播距离和宽度。

潜艇的近水面航行工况范围最大可达  $2/3$  艇长。由已有文献可知,目前关于自由表面尾迹研究的潜深与艇长之比在  $10\% \sim 20\%$ 。随着探测技术(遥感卫星、孔径雷达)的发展,可探测到更大潜深下潜艇所造成的自由液面尾迹和内波尾迹,所以需研究更深潜深下潜艇所造成的尾迹特征。本文将在潜深大于 20% 艇长的状态下,研究航速、相对潜深和海水分层等因素对自由表面尾迹特征和内波特征的影响规律,尾迹轮廓特征采用 Canny 边缘检测理论进行提取,研究结果为将来通过潜艇尾迹特征进行图像识别提供依据。

## 1 数值研究方法

### 1.1 控制方程

考虑到潜艇的航行马赫数(潜艇航速与当地声速的比值)小于 0.3,可忽略流体的压缩性影响。雷诺数为  $10^7$  量级,控制方程采用不可压雷诺时,均 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + f_i \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $u_i$ 为时均速度分量; $u'_i$ 为脉动速度; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项; $x_i$ 为笛卡尔坐标轴方向( $i, j=1, 2, 3$ ); $f$ 为质量力; $\mu$ 为动力黏度; $\rho$ 为流体密度; $p$ 为压强; $t$ 为时间; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为未知的物理量,需引入湍流模型进行封闭,采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行模拟。

RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \left( \mu_1 + \frac{\rho k^2 C_\mu}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \left( \mu_1 + \frac{\rho \varepsilon^2 C_\mu}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (5)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{kG_k}{2\rho C_{\mu} \varepsilon^2} \quad (7)$$

式(3)~式(7)中:  $E_{ij}$  为时均应变率;  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ;  $C_{\mu} = 0.08$ ;  $\alpha_k = 1.39$ ;  $\alpha_\varepsilon = 1.39$ ;  $\eta_0 = 4.37$ ;  $\beta = 0.01$ 。

采用多相流 (Volume of Fluid, VOF) 模型捕捉气/液-液/液流体交界面, 并引入体积分数实现计算域内不同相的捕捉。VOF 对流方程为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + u_i \frac{\partial \gamma}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

式(8)中: 当流体密度只有较小相时,  $\gamma = 0$ ; 当同时存在 2 种流体及交界面时,  $0 < \gamma < 1$ ; 当流体的密度只有较大相时,  $\gamma = 1$ 。

## 1.2 图像特征提取 Canny 算子

边缘检测是图像处理和计算机视觉中的基本问题, 边缘检测的目的是标识数字图像中亮度变化明显的点。采用 Canny 边缘检测算子对自由液面尾迹云图进行特征提取, 消除云图中的颜色干扰, 提取出计算流体力学尾迹云图中更细致的轮廓特征, 也可以更加精确测量尾迹角度。

1) Canny 算子的原理是先通过高斯滤波对图像的噪声进行处理。高斯滤波核大小为  $5 \times 5$  的矩阵, 有

$$\frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2) 通过 Sobel 算子, 对图片的  $x$  和  $y$  方向卷积, 计算颜色梯度和方向, 卷积核分别用  $dx$  和  $dy$  表示, 有

$$dx = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$dy = \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3) 卷积核  $dx$  和卷积核  $dy$  分别与图像进行计算, 其结果分别用  $Gx$  和  $Gy$  来表示, 计算梯度幅值  $S$  为

$$S = \sqrt{Gx^2 + Gy^2} \quad (12)$$

$\theta$  为梯度的方向, 有

$$\theta = \arctan\left(\frac{Gy}{Gx}\right) \quad (13)$$

4) 使用非极大值抑制法, 选择梯度最大值确定边界, 根据双阈值来约束轮廓, 得到最终的轮廓图。

## 1.3 计算几何模型

模型选取美国国防先进技术研究署<sup>[14]</sup>设计的 Suboff 裸潜艇为研究对象, 该潜艇模型全长  $L$  为 4.356 m, 艇身最大直径  $D$  为 0.508 m。为模拟潜艇直航时的绕流流场, 捕捉自由表面水动力尾迹特征, 本文采用的计算域划分示意图 1。图 1 中: 起始自由液面为水平面, 与潜艇模型中心轴线的距离为  $H$ , 计算域入口距艇艏约  $5L$ , 下游出口截面距艇艉约  $20L$ , 计算域上下壁面距艇的中心线约  $4L$ 。计算域的左侧和右侧壁面距潜艇中心线的距离都约为  $10L$  如图 1b 所示。

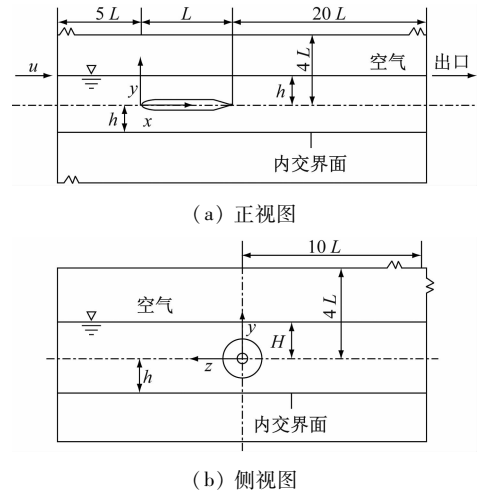


图 1 计算域划分示意

Fig. 1 Diagram of the computational domain

在考虑海水分层的计算模型中, 密度分层界面位于  $y = -h$  处如图 1a 所示, 此时在密度分层界面的上方海水密度是  $998.2 \text{ kg/m}^3$ , 在下方的海水密度是  $1026 \text{ kg/m}^3$ 。

流场计算边界涉及固体壁面、进/出口、远场边界、自由表面和气液-液交界面。其中: 潜艇模型壁面采用无滑移壁面条件, 进口给定速度分布, 出口给定自由出流; 计算域其他 4 个计算边界离艇体足够远, 其动量运输以减弱至非常低的水平, 因此, 可设定为剪切应力等于零的无滑移壁面条件; 对于自由液面和海水密度分层处的气液/液-液交界面, 需要利用 (User Defined Functions, UDF) 函数定义界面压强和海水压强沿  $y$  方向的分布情况。

体积分数模型多相流 VOF 模型是一种用于模拟 2 种或多种不混合流体界面流动的数值方法, 其核心思想是以计算域中每个单元的流体体积分数作为主要参数追踪流体界面。该方法以较小的计算量可实现复杂交界面的追踪, 采用 VOF 方法可精确捕

提到自由表面尾迹和内交界面尾迹。

#### 1.4 网格划分及无关性验证

为提高计算质量,采用多区域、结构化网格对计算域进行离散,计算域及潜艇网格示意图2。图2中:在潜艇模型表面区域、尾迹区域、自由液面和内波界面区域进行网格加密,提高流动模拟精度, $Y^+$ 值保持在15~300之间,满足湍流模型的要求。

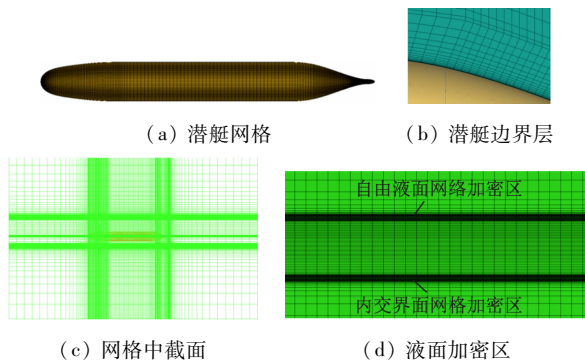


图2 计算域及潜艇网格示意

Fig.2 Schematic of the computational domain and submarine mesh

流水的来流速度为3.05 m/s,计算域网格总数分别为726.5万、845.9万、986.8万、1 303万时,数值计算得到艇体模型的阻力值见表1,试验值是文献[14]在相同条件下的测量结果。

表1 不同计算网格下潜艇的阻力值(航速 $u = 3.05$  m/s)

Tab.1 Resistance values for submarines with different calculation grids

网格顺序	网格的数目	计算值/N	试验值/N	误差/%
第一套网格	7 264 539	89.4	87.4	2.3
第二套网格	8 459 340	88.7	87.4	1.4
第三套网格	9 867 847	86.4	87.4	1.1
第四套网格	13 028 533	86.5	87.4	1.0

潜艇模型阻力误差和波高随计算网络总数的分布趋势图见图3。

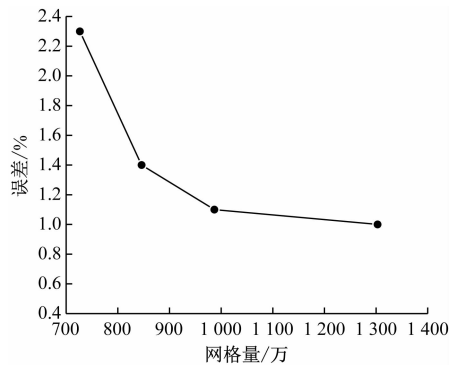
1) 由图3a可知:计算值与试验值的相对误差随着网格数增加逐渐降低,直至网格量达到1 303万时,下降到1%,同时,随着网格量增加,相对误差的下降趋势变缓,网格数量大于986万后,下降速度明显减少,二者相差0.1%。

2) 由图3b可知:波高的变化趋势也在收敛。综合模拟精度和计算资源的考虑,选择第三套网格作为后续计算研究的模型。

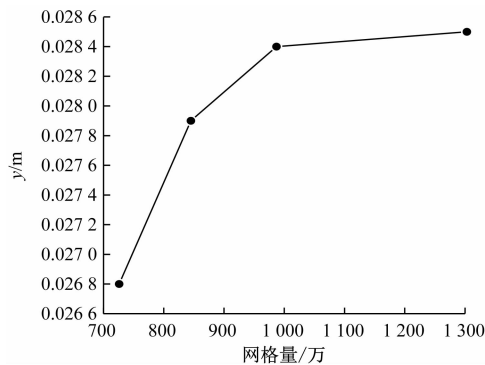
## 2 计算结果与分析

### 2.1 计算工况设定

1) 研究在海水密度均匀的条件下,相对潜深



(a) 阻力误差变化图



(b) 波高变化趋势图

图3 潜艇模型阻力误差和波高随计算网格总数的分布趋势图

Fig.3 Distribution of submarine model resistance error and wave height with total grid cell count

( $H/L$ )和弗劳德数( $Fr(u/\sqrt{gL})$ )对自由表面水动力尾迹特征的影响规律,研究工况见表2中的工况1~工况11。

2) 考虑到海水温度和盐度随海水深度变化,艇体可能在层化流条件下航行,此时,海水的流体微团受到扰动偏离其平衡位置进而形成内波尾迹。

3) 进一步研究固定相对潜深( $H/L = 0.23$ )和海水密度分层位置( $h/L = -0.11$ )条件下, $Fr$ 数对分层界面的内波特征、内波向自由表面的传播和内波对自由表面水动力尾迹的影响规律,具体计算工况见表2中的工况12~工况15。

### 2.2 数值计算结果

#### 2.2.1 海水无分层情况下自由液面尾迹特征分析

$H/L = 0.23$ 、 $Fr$ 分别为0.26、0.35、0.44和0.53时, $z = 0$ (如图1b所示)所在截面上的波高分布见图4。由图4可知: $Fr$ 的变化对自由液面的波形产生一定的影响作用,自由表面波的波长随着 $Fr$ 增大而增大。因为当 $Fr$ 增大时,潜艇周围受到的扰动增大,增强自由液面的扰动;随着 $Fr$ 从0.26增长到0.53,第一波峰均发生在艇艏处,其波峰值自0.0053 m增长到0.0270 m,增长约410%。 $Fr$ 对

表2 计算具体工况设定  
Tab.2 Experimental conditions

计算案例号	海水分层情况	相对潜深( $H/L$ )	$Fr$
1	否	0.23	0.26
2	否	0.23	0.35
3	否	0.23	0.44
4	否	0.23	0.53
5	否	0.35	0.53
6	否	0.52	0.53
7	否	0.69	0.53
8	否	0.52	0.26
9	否	0.52	0.35
10	否	0.52	0.44
11	否	0.52	0.53
12	$H/L=0.11$	0.23	0.26
13	$H/L=0.11$	0.23	0.35
14	$H/L=0.11$	0.23	0.44
15	$H/L=0.11$	0.23	0.53

第一波峰峰值和第一波谷谷值绝对值的影响图见图5。图5中:第一波峰峰值随 $Fr$ 呈线性增长,斜率为0.095。取 $Fr$ 为0.53时,自由液面的波长值为7.744 m,根据文献[15]给出的自由表面波长公式( $2\pi u^2/g$ )计算可得理论值7.633 m,两者相对误差约为1.4%。

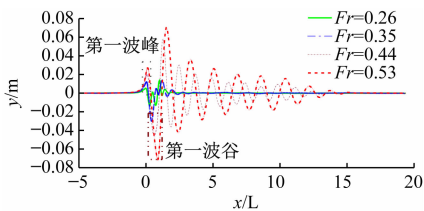
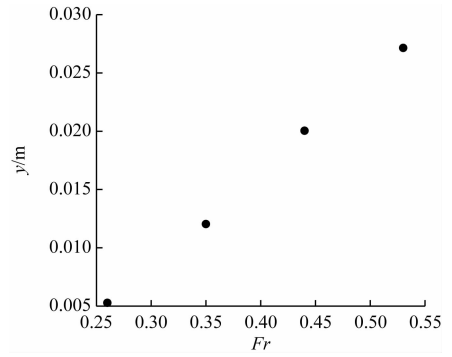


图4  $H/L=0.23$ 时 $z=0$ 截面上波高分布图

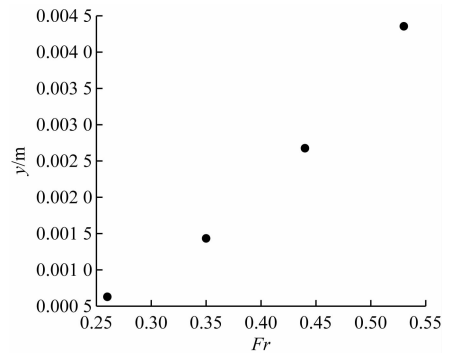
Fig.4 Wave height distribution on the cross section at  $z=0$  for  $H/L=0.23$

由图5可知:自由表面第一波谷的位置随 $Fr$ 增大向下游方向移动,波谷的振幅也随之增加,波谷从 $-0.0136497$  m变换到 $-0.071422$  m,其幅值增长428%。第一波谷谷值绝对值随 $Fr$ 的分布如图5b所示,波谷值的绝对值与 $Fr$ 依旧呈线性关系,其斜率为0.088。第一波谷谷值的绝对值随 $Fr$ 线性变化的斜率和第一波峰峰值斜率相差7%。

另外, $Fr$ 为0.26时,首波峰和最大波峰中间存在2个波谷,但随着 $Fr$ 的增加,在首波峰和最大波



(a) 第一波峰峰值



(b) 第一波谷绝对值

图5  $Fr$ 对第一波峰值峰值和第一波谷谷值的影响  
Fig.5 Effect of  $Fr$  on first wave peak peak and first wave trough values

峰中间的波谷逐渐变为一个。当固定深度时自由液面波的波高与 $Fr$ 存在线性关系。

上述所使用的 $Fr$ 为基于速度而言,而基于深度的 $Fr$ 公式见式(14),在式(14)中为与基于速度所表示的 $Fr$ 做区分, $Fr_1$ 表示为

$$Fr_1 = \sqrt{\frac{u^2}{g(h_1 + h_2)}} \quad (14)$$

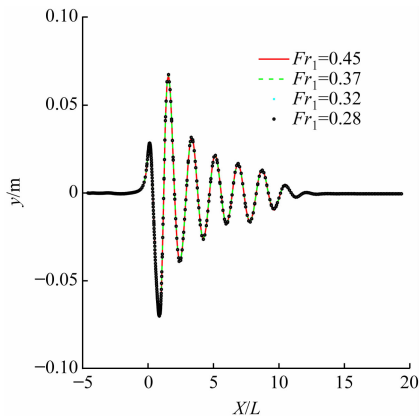
式(14)中: $u$ 为潜艇的航速; $g$ 为重力加速度; $h_1$ 为低密度海水的深度; $h_2$ 为高密度海水的深度。

由式(14)可知: $Fr_1$ 只与海水深度有关系在均匀流中式(14)中 $h_2$ 的值为0,所以 $Fr_1$ 只与 $h_1$ 的大小有关系。

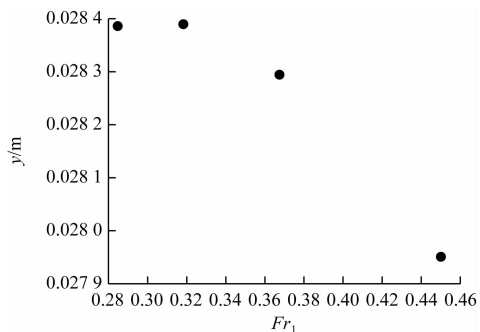
为研究 $Fr_1$ 对自由液面的尾迹的影响,选择 $Fr_1$ 分别为0.28、0.32、0.37和0.45时研究对自由液面波的影响。

相对潜深( $H/L$ )为0.23时,速度选择 $Fr$ 为0.53时,不同 $Fr_1$ 值对自由液面尾迹的影响见图6。由图6可知: $Fr_1$ 对自由液面尾迹的波长和相位以及自由液面的波高影响都较小。

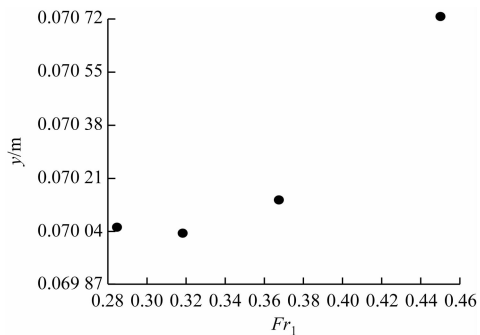
$Fr_1$ 对第一波峰峰值和第一波谷谷值绝对值的影响见图7。图7中:横坐标为 $Fr_1$ 的值,纵坐标分别为第一波峰值和第一波谷值绝对值;随着 $Fr_1$ 的

图6  $Fr_1$  对  $z=0$  截面上波高分布的影响Fig. 6 Effect of  $Fr_1$  on wave elevation distribution at the  $z=0$  plane

增大,波峰的峰值呈现下降趋势,而波谷的谷值绝对值呈现上升的趋势,但都与  $Fr_1$  不呈线性关系。



(a) 第一波峰峰值



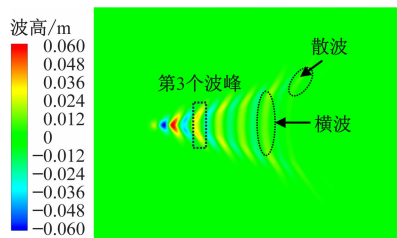
(b) 第一波谷绝对值

图7  $Fr_1$  对第一波峰值峰值和第一波谷谷值的影响Fig. 7 Effect of  $Fr_1$  on first wave peak peak and first wave trough values

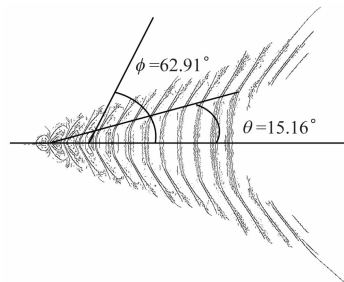
$H/L=0.23$  条件下  $Fr$  为 0.53 时自由液面波高分云图及特征提取图见图 8a,采用 Canny 算子对图 8a 进行边缘检测获得自由液面波的特征轮廓见图 8b。由图 8a 可知:自由表面尾迹由横波和散波构成,整体上为“V”形,其特征类似 KELVIN 波的特征。

为便于分析,引入尾迹角  $\theta$  和横波张角  $\phi$  描述。 $\theta$  的测量方式见图 8b,取波系中轴线和最后一

个横波尾部的夹角。横波张角的测量则选取在最大波峰后的第一个波谷进行测量,读取其轮廓曲线与中轴线的夹角。图 8b 可测量出当  $H/L$  为 0.23,  $Fr$  为 0.53 时,尾迹角为  $\theta$  为  $15.16^\circ$ ,横波张角为  $62.91^\circ$ 。



(a) 波高分云图



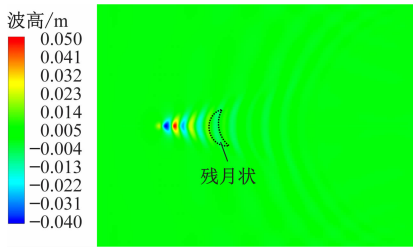
(b) 特征提取图

图8  $H/L=0.23$  条件下  $Fr=0.53$  时自由液面波高分云图及特征提取图Fig. 8 Cloud diagram of free liquid surface wave height distribution and feature extraction at  $Fr=0.53$  under  $H/L=0.23$  condition

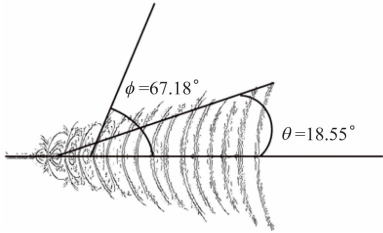
$H/L=0.23$  条件下  $Fr$  为 0.44 时自由液面波高分云图及特征提取图见图 9,此时自由液面尾迹从整体来看依旧呈明显“V”形的类 KELVIN 波。与图 8 相比较,可发现从整体波系来看此时的波已经只有横波组成,横波的形状为“残月状”。由图 9b 可知:此时尾迹由横波组成,尾迹角  $\theta$  为  $18.55^\circ$ ,横波张角为  $67.18^\circ$ 。与  $Fr=0.53$  时对比,可看到此时无论是  $\theta$  还是横波张角都是随着  $Fr$  的增大而减小的。

$H/L=0.23$  条件下  $Fr$  为 0.35 和 0.26 时的自由液面波高分云图分布见图 10。由图 10 可知:随着  $Fr$  的继续降低,从整体波系形状看,已经不再是类似 KELVIN 波,在  $Fr$  为 0.35 时,最大波峰之后的单个波的形状变成“V”形,而非“残月状”。在向后的传播过程中,基本保持平行。当  $Fr$  降到 0.26 时,此时自由液面未观测到明显的“V”形波。

在  $H/L=0.52$  条件下  $Fr$  为 0.26、0.35、0.44、0.53 时的自由液面波高分云图见图 11。图 11 中:自由表面波形随  $Fr$  的变化规律在  $Fr > 0.35$  之后与  $H/L=0.23$  时基本相似;但相对潜深增加后  $Fr$  为 0.26 和 0.35 时,自由液面尾迹出现文献[16]中



(a) 波高云图



(b) 特征提取图

图9  $H/L = 0.23$  条件下  $Fr = 0.44$  时自由液面波高云图及特征提取图

Fig.9 Cloud diagram of free liquid surface wave height and feature extraction at  $Fr = 0.44$  under  $H/L = 0.23$  condition

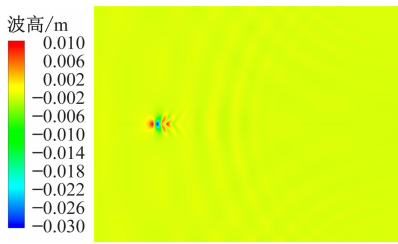
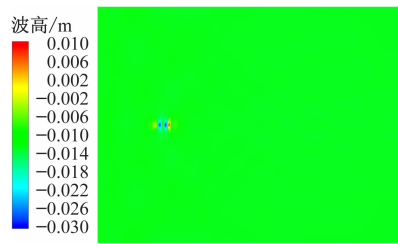
(a)  $Fr = 0.35$ (b)  $Fr = 0.26$ 

图10  $H/L = 0.23$  条件下  $Fr$  为 0.35 和 0.26 时的自由液面波高云图分布

Fig.10 Cloudy distribution of free liquid surface wave heights for  $Fr$  of 0.35 and 0.26 at  $H/L = 0.23$

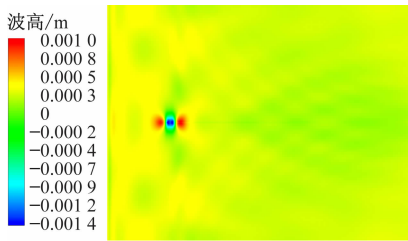
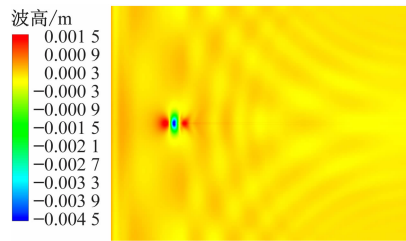
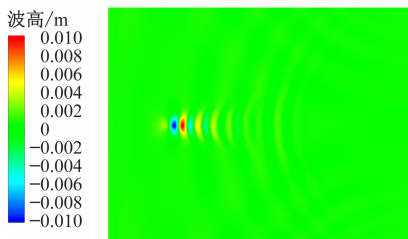
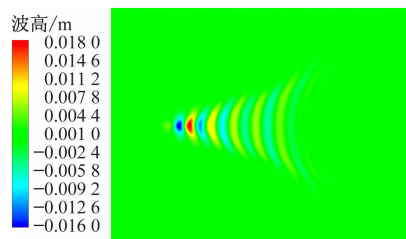
(a)  $Fr = 0.26$ (b)  $Fr = 0.35$ (c)  $Fr = 0.44$ (d)  $Fr = 0.53$ 

图11  $H/L = 0.52$  条件下  $Fr$  对自由液面波高云图影响

Fig.11 Effect of  $Fr$  on free-surface wave height maps for  $H/L = 0.52$  conditions

“斑”状尾迹。斑状尾迹形态不仅是关于潜艇的中轴线对称,同时也关于潜艇前后对称。 $Fr = 0.53$  条件下  $Z = 0$  截面处  $H/L$  对自由液面波高的影响见图12。由图11和图12可知:自由液面尾迹特征是由相对潜深和  $Fr$  共同决定的。

$Fr = 0.53$  条件下  $z = 0$  处截面上自由液面波高随相对潜深( $H/L$ )的分布如图12所示, $H/L$  分别是 0.23、0.35、0.52、0.69。由图12可知:第一波峰峰值随着相对潜深  $H/L$  增大而减小,从 0.028 40 m 降低到 0.001 74 m,减少约 94%。第一波谷谷值的绝对值随着相对潜深的增大从 0.07 m 降低到 0.01 m,减少 85%。这表明相对潜深对于自由液面波的幅值有重要影响;自由液面波波长、波的相位和传播距离不随  $H/L$  变化。

第一波峰峰值和第一波谷谷值绝对值随  $H/L$  的变化情况见图13。由图13可知:无论是第一波峰峰值的变化还是第一波谷谷值绝对值的变化与相对潜深都不呈线性关系。

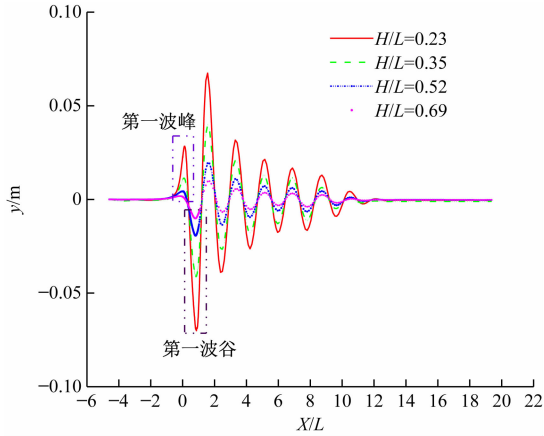
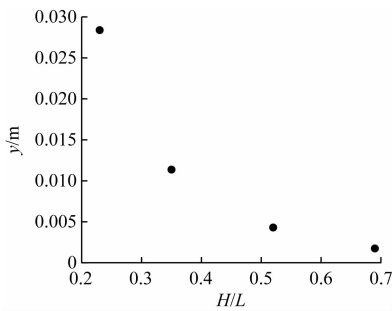
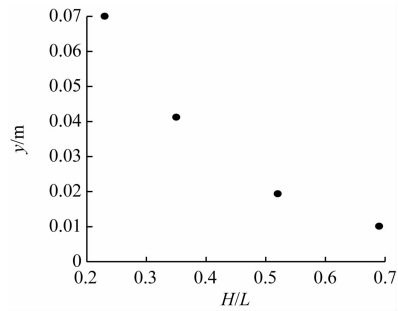


图 12  $Fr=0.53$  条件下  $Z=0$  截面处  $H/L$  对自由液面波高的影响

Fig. 12 Effect of  $H/L$  on free liquid surface wave height at the  $Z=0$  cross-section under the condition of  $Fr=0.53$



(a) 第一波峰峰值



(b) 第一波谷谷值绝对值

图 13  $Fr=0.53$  条件下  $z=0$  截面处第一波峰峰值和第一波谷谷值的绝对值随  $H/L$  变化图

Fig. 13 Plot of the absolute values of the first peaks and troughs of the first wave at the  $z=0$  cross-section for  $Fr=0.53$  against  $H/L$

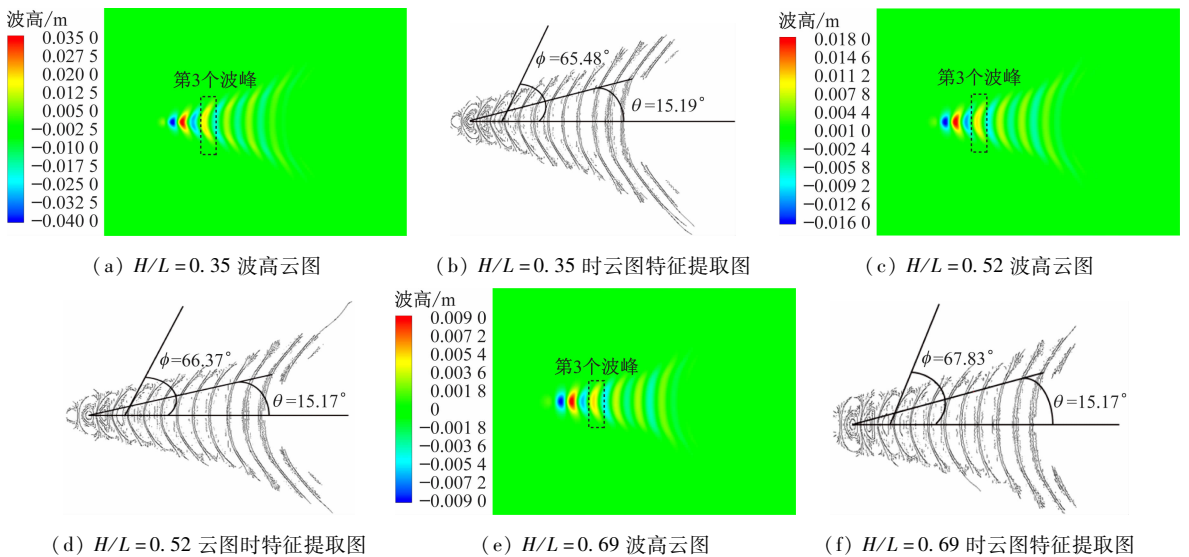


图 14  $Fr=0.53$  条件下  $H/L$  对自由液面波高的影响

Fig. 14 Effect of  $H/L$  on free liquid surface trailing for  $Fr=0.53$  condition

$Fr$  为 0.53 的条件下,  $H/L$  分别为 0.35、0.52、0.69 时自由液面尾迹波高云图和波高云图的特征提取图见图 14。图 8 是  $Fr$  同为 0.53 条件下,  $H/L=0.23$  时的尾迹云图及特征提取图, 可以与图 14 形成对比。由图 14a、图 14c、图 14e 和图 8a 可知: 自由液面尾迹在  $H/L$  较小的条件下, 尾迹由横波和散波组成, 随着  $H/L$  的增大, 自由液面尾迹逐渐过渡到只剩下横波。同样这个现象可通过观察单个波得到, 通过观察图 8a 和图 14a、图 14c 和图 14e 中第 3 个波峰, 从最初的散波随着  $H/L$  增大, 逐渐变成横波。

由图 8b、图 14b、图 14d 和图 14f 可知: 随着  $H/L$  的增大, 尾迹角  $\theta$  从  $15.16^\circ$  增加到  $15.17^\circ$ , 几乎没有变化, 而横波张角从  $62.91^\circ$  随着  $H/L$  的增大逐渐

增大到  $67.83^\circ$ , 可得出横波张角随着相对潜深的增大而增大的结论; 即使相对潜深达到最大条件下, 散波同样存在, 并没有如云图显示的只存在横波。造

成这个现象的原因是, 散波一直存在, 横波张角在随着相对潜深的增大而增大的过程中, 2 个散波进行合并, 所以造成散波消失的假象。这个现象从第 3

个波峰的变化中也能看出来,散波并不是消失而是随着张角的增大,2个散波连接到一起,看起来和横波无异。由图14可知:随着 $H/L$ 的增大,在自由表面上的扰动区域也在减少。

### 2.2.2 强分层状态下航速对内波的影响

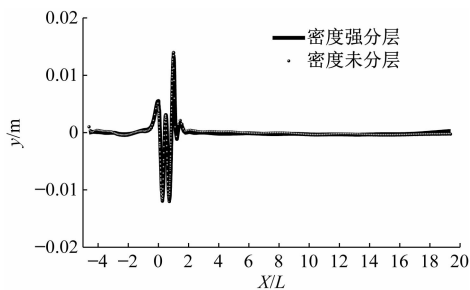
在相对潜深 $H/L = 0.23$ 、盐水和淡水的交界面位于潜艇模型下方 $H/L = 0.11$ 处计算潜艇流场,研究 $Fr$ 对分层交界面以内波对自由表面波的影响。

$Fr$ 分别为0.26、0.35、0.44、0.53时强分层所在表面处内波波高云图见图15。图15中:数值越大表示此处为波峰,数值越小表示此处为波谷。 $y = -0.5$  m处为盐水和淡水的起始交界面,盐水和淡水的交界面在艇下方,具体工况如表2工况12~工况15所示。

由图15a和图15b可知:此时内波尾迹只有明亮的“V”形波,随着 $Fr$ 的增大,可看到图15b相比于图15a中的“V”形夹角在变小,其波峰变低。

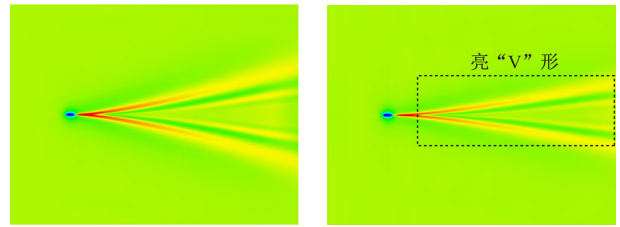
图15c中: $Fr$ 为0.44时内波尾迹很好地展示了内波从“V”形开始向“鱼骨形”过渡现象,此时最外侧的波谷呈长“V”形,开始出现间断性的对称波谷,间断性的对称波谷对亮“V”形波进行挤压,造成“V”形波的堆积,而随着距离的增加,能量的减少,最外侧的波谷并没有继续呈对称增加,所以后面的散波继续保持“V”形。

图15d中: $Fr$ 最大,其内波的形态最完整。内波有明亮的“V”形散波,也有交替出现的横波。内波尾迹的横波与自由液面上的横波大不相同,其内波的横波是由中间的亮“V”形波被挤压,出现堆积现象而成,使此时内波尾迹的形状为文献[17]所说的“鱼骨形”。



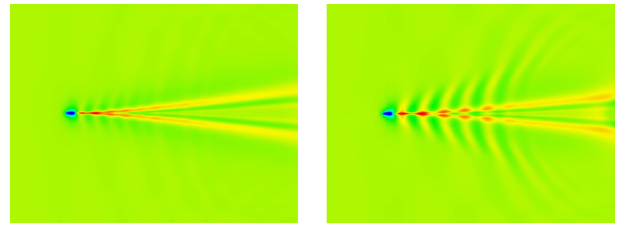
(a)  $Fr = 0.26$

由图15可知:内波的形态随着 $Fr$ 的增大从最初的亮“V”形逐渐转化为“鱼骨形”,可得知 $Fr$ 数对内波的特征影响巨大。



(a)  $Fr = 0.26$

(b)  $Fr = 0.35$



(c)  $Fr = 0.44$

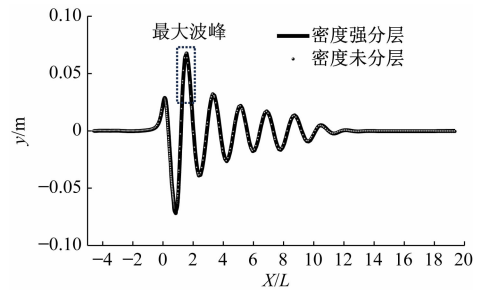
(d)  $Fr = 0.53$



图15  $H/L = 0.11$ 条件下 $Fr$ 对内波波高云图的影响

Fig. 15 Effect of  $Fr$  on internal wave height maps under  $H/L = 0.11$

$H/L$ 和 $Fr$ 相同的条件下,海水存在密度分层和无分层时 $z = 0$ 截面上自由液面处波高曲线见图16。密度分层对自由液面波的波长、相位影响非常小,但会增强表面波的波幅。由图16b可知: $Fr = 0.53$ 时,存在密度分层的波峰幅值相比于无分层工况增加1.38%,第一波谷幅值增加2.54%,最大波峰幅值增加4.73%。



(b)  $Fr = 0.53$

图16 密度分层在 $H/L = 0.23$ 时不同 $Fr$ 下对自由液面中截面波高的影响

Fig. 16 Effect of density stratification on cross-sectional wave heights in the free liquid surface at different  $Fr$  at  $H/L = 0.23$

存在海水密度分层和无密度分层2种工况下自由液面波高云图对比以及距潜艇 $-5.7L$ 和 $-6.7L$ 处所截取的波高示意图17。由图17a和图17b可知:此时的云图并未发生特征颠覆性变化,存在海

水密度分层时,在末端多传播一个散波,从最后一个横波来看,存在密度分层时传播的宽度也要强于密度未分层时;图17c和图17d分别为在 $-z$ 轴方向距潜艇 $-5.7L$ 和 $-6.7L$ 处波高示意,无论是在 $z =$

-5.7  $L$  处还是  $z = -6.7 L$  处,密度分层条件下的末端的波高要高于密度未分层。同时,发现横向距离越远,则分层带来的效果越明显,密度强分层对自由液面尾迹的传播起增强作用。与文献[11]得出的结论一致。

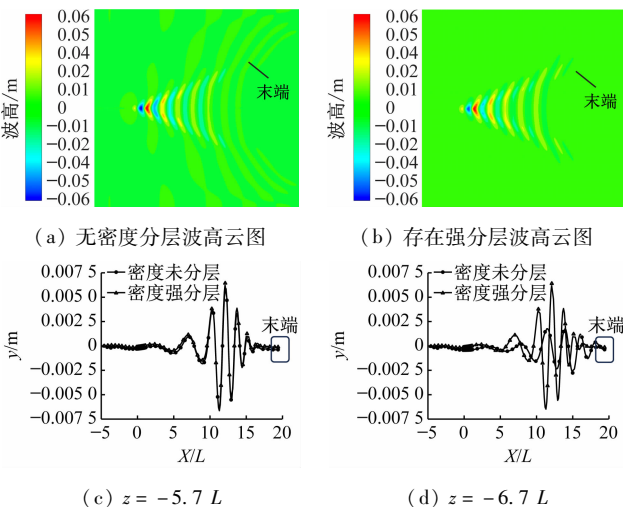


图 17 密度分层对  $H/L$  为 0.23 下  $Fr=0.53$  时自由液面的影响

Fig. 17 Effect of density stratification on the free liquid level at  $Fr=0.53$  for  $H/L$  of 0.23

海水密度强分层条件下和未分层条件下不同相对潜深处压力随  $x$  轴的变化值分别见图 18 和图 19,海水密度均匀条件下不同相对潜深处压力随  $x$  轴的变化。由图 18a 和图 19a 可知:存在密度分层时,因为内波的存在,分层交界面上压力变化波动更剧烈;图 19a 中呈现出的扰动很小,压力波动几乎为 0。

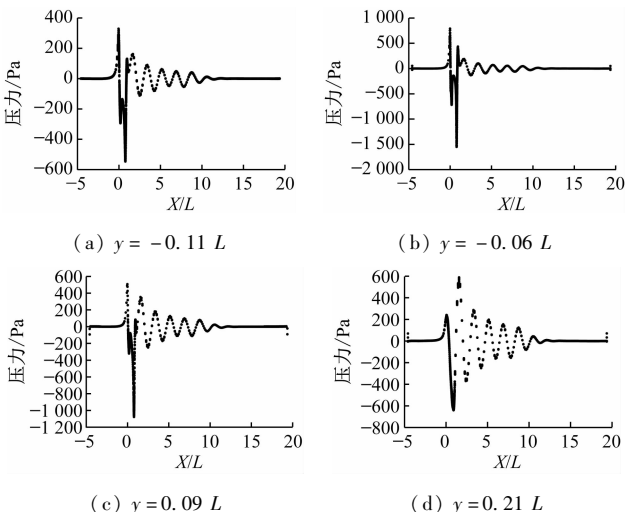


图 18 海水密度强分层条件下不同  $y$  轴处压力随  $x$  轴变化图

Fig. 18 Plot of pressure versus  $x$ -axis at different  $y$ -axis for strongly stratified conditions of seawater density

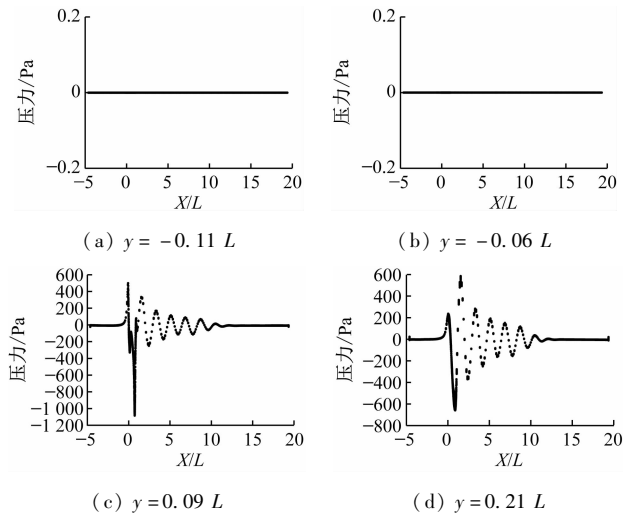


图 19 海水密度未分层条件下不同  $y$  轴处压力随  $x$  轴变化图

Fig. 19 Plot of pressure versus  $x$ -axis at different  $y$ -axis for unstratified conditions of seawater density

压力变化向上传递的过程中越靠近潜艇扰动越大。由于潜艇周围的压力变化越剧烈,因此相互干扰,此时的压力扰动将变大如图 18b 所示。而从图 19b 可以看到此时的压力扰动依旧很弱。

由图 18c 和图 18d 中可知:发现当压力扰动远离潜艇时,越靠近自由液面,压力变化剧烈,图 19c 和图 19d 同样可以说明这个情况。图 18 和图 19 可得出结论,压力扰动会在靠近潜艇和交界面的时候会被加强。因此,强分层的存在增强自由表面的尾迹的原因,从压力角度来分析,原因是海水密度分层条件下内波的存在使海水中的压力扰动得到加强,从而增加自由液面尾迹的扰动,因此自由液面尾迹得到增强。

### 3 结束语

本文采用计算流体力学方法,对相对潜深 ( $H/L$ )、 $Fr$  和海水密度分层对自由液面尾迹的影响进行研究,同时,对  $Fr$  对内波的影响和内波如何对自由液面尾迹产生影响展开分析,主要结论如下:

1) 自由液面尾迹第一波峰的位置并不随相对潜深、 $Fr$  和海水密度分层的影响而发生明显变化。自由液面波高与基于速度的  $Fr$  呈线性关系,与相对潜深并无此关系,自由液面尾迹角和横波张角随  $Fr$  增大而减小,尾迹角随相对潜深的变化不明显,横波张角随着相对潜深的增大而增大,自由液面散波会随着相对潜深的增大进行合并。

2) 在相对潜深为 0.53 时,低  $Fr$  的条件下,潜艇在自由表面生成的尾迹为首尾 2 个波峰,中间是

波谷,云图呈“斑”状,在高  $Fr$  时,自由液面尾迹出现类 KELVIN 波。表明自由表面尾迹的形态是相互作用的结果,由  $Fr$  和相对潜深共同影响。

3) 内波的波形随着  $Fr$  增大,会从亮“V”形,逐渐转化为“鱼骨形”,在此过程中“V”形的角度随着  $Fr$  增大而减小。

4) 内波不会影响自由液面尾迹的波长和相位,相比于未分层的情况下,内波的存在会增强压力的扰动从而增强尾迹特征。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN Q, XUAN Y M, LIN Q Q, et al. Evolutions of hydrodynamic and electromagnetic wakes induced by underwater vehicles [J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 140:1-23.
- [2] 孙岚,李厚朴,边少锋,等. 基于重力梯度的潜艇探测方法研究[J]. *海洋测绘*, 2010, 30(2): 24-27.  
SUN L, LI H P, BIAN S F, et al. Study on the submarine detection method based on the gravity gradient [J]. *Ocean Mapping*, 2010, 30(2): 24-27. (in Chinese)
- [3] MILES J W. Internal waves generated by a horizontally moving source[J]. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1971, 2:63-87.
- [4] DALL W H. The norwegian north polar expedition, 1893—1896, scientific result [J]. *Nature*, 1900, 12(302): 562-563.
- [5] ZHENG M M, LIU Y D, WANG Y J, et al. Simulation and experimental research on hydrodynamic performance of fully attached submarine in the surface and near the surface modes [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 85-112.
- [6] WU Y Y, GUO C Y, HAN Y, et al. Numerical investigation on the influence of free surface on the hydrodynamic and wake characteristics of submarine [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(7):1-24.
- [7] LI D, YANG Q, LIN Z, et al. Numerical investigation on the wave interferences of submerged bodies operating near the free surface[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, 13(3): 65-74.
- [8] NGUYEN H P. Submarine detection from space: a study of Russian capabilities [M]. United States: Naval Institute Press, 1993.
- [9] SPEDDING G R. Wake signature detection[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, (46): 273-302
- [10] 牛明昌. 密度分层流中运动潜体尾流场特征研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018:67-68.  
NIU M C. Research on the characteristics of wake field generated by submerged body moving in pycnocline [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 67-68. (in Chinese)
- [11] 马卫状. 稳定分层流中潜航体尾流场及自由面特征研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020:79-81.  
MA W Z. Research on wake field and free surface characteristics of submerged a body in stable stratified flow [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020: 79-81. (in Chinese)
- [12] HUANG F L, MENG Q J, CAO L S, et al. Wakes and free surface signatures of a generic submarine in the homogeneous and linearly stratified fluid [J]. *Ocean engineering*, 2022, 250: 62-81
- [13] CAO L S, GAO G, GUO E K, et al. Hydrodynamic performances and wakes induced by a generic submarine operating near the free surface in continuously stratified fluid [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2023, 35(3): 396-406.
- [14] ZHAO B W, YUN Y Y, HU F F, et al. Hydrodynamic coefficients of the DARPA SUBOFF AFF-8 in rotating arm maneuver: part I: test technology and validation [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 48-64.
- [15] 李丹梦. 水下运动目标水面波纹的数值模拟及分析 [D]. 北京:北京理工大学,2021:32-33.  
LI D M. The numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2021:32-33. (in Chinese)
- [16] 许英豪. 全附体潜艇海面映波及目标特性仿真研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021:24-25.  
XUN Y H. Simulation research on sea surface reflection and target characteristics of full appendage submarine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021: 24-25. (in Chinese)
- [17] 杨哲超. 潜艇水动力尾迹特性与改善措施研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021: 35-37.  
YANG Z C. Research on the characteristics and improvement measures of submarine hydrodynamic wake [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021: 35-37. (in Chinese)