

[引用格式] 李志远, 杜炀, 喻敏. 水下航行器尾涡场的数值仿真与声信号特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(4): 445-453.

# 水下航行器尾涡场的数值仿真与声信号特性研究

李志远<sup>1, 2</sup>, 杜 炀<sup>2</sup>, 朱海龙<sup>3</sup>, 喻 敏<sup>2,\*</sup>

(1. 宜昌测试技术研究所, 湖北 宜昌 443003;  
2. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;  
3. 陆装防化局驻宜昌地区防化室, 湖北 宜昌 443000)

**摘要** 为研究水下航行器产生的尾涡在水下目标探测上的应用, 基于 Fluent 仿真软件和全附体 Suboff 模型, 对水下航行器直航、俯仰、偏航工况下的尾涡场进行仿真与分析, 研究水下航行器尾涡场对声信号相位特性的影响。研究结果表明: 采用垂直线列阵探测航行器偏航运动产生的尾涡时, 声信号存在明显的相位跳变; 水平线列阵探测航行器俯仰运动产生的尾涡时, 声信号存在明显的相位跳变; 航行器直航运动时, 由于尾涡空间结构的对称性, 采用上述 2 种类型阵列探测, 通过尾涡的声信号未呈现明显的相位跳变。航行器的运动参数变化会影响尾涡的空间分布与强度, 从而影响声信号相位跳变特性。基于水下航行器运动状态与尾涡场的关联, 以及尾涡场与声信号相位跳变的关联, 可发展水下航行器间接探测方法, 实现水下航行器的探测与运动状态判断。

**关键词** 涡流场; 数值仿真; 水下航行器; 声学特性

**中图分类号** U661.1      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2025)04-0445-09

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.04.008

## Research on Simulation and Acoustic Signal Characteristics of Underwater Vehicle Wake Vortex Fields

LI Zhiyuan<sup>1, 2</sup>, DU Yang<sup>2</sup>, ZHU Hailong<sup>3</sup>, YU Min<sup>2,\*</sup>

(1. Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang 443003, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. Chemical Defense Representative Office of Equipment Department Located in Yichang Area, Yichang 443000, China)

**Abstract** To investigate the application of underwater vehicle wake vortices in underwater target detection, simulation and analysis of wake vortex fields under straight navigation, pitch, and yaw conditions are conducted using Fluent software and the fully appended Suboff model. The influence of the wake vortex fields of underwater vehicles on the phase characteristics of acoustic signals are studied. The results demonstrate that there is obvious phase transition in acoustic signals when vertical linear array is used to monitor yaw-induced wake vortices, while similar phase discontinuities occur when horizontal linear array is used to observe pitch-generated vortices. In contrast, straight navigation produces symmetric wake fields that prevent detectable phase transition in either array

收稿日期: 2025-03-18

作者简介: 李志远 (1982-), 博士, 研究员, 主要从事舰船物理场特征研究。

\*通信作者: 喻敏 (1978-), 博士, 教授, 主要从事水下目标识别、水下定位研究。

基金项目: 国家重点研发计划“自主俘能深海采矿底层噪声高效监测技术”(2023YFC2811900), 国家自然科学基金“基于水下涡声耦合的非声探测技术模型构建与目标识别方法研究”(52271349)。

configuration. Variations in vehicle motion parameters alter spatial distribution and intensity of wake vortices, thereby affecting phase jump characteristics. By leveraging the correlation between vehicle motion states and wake vortex fields, along with the association between wake vortex fields and acoustic signal phase jumps, an indirect detection method could be developed for underwater vehicle detection and motion state identification.

**Key words** vortex field; numerical simulation; underwatr vehicle; acoustic characteristic

## 0 引言

水下航行器在水下航行时不可避免地会产生尾涡，这些尾涡具有持续时间长、尺度大、难以模拟、无法消除等特点<sup>[1]</sup>，基于尾涡可发展间接探测水下航行器的方法。而声波通过涡流场后，其传播受到涡流场的影响，最终导致声信号出现变化<sup>[2]</sup>。为此，可研究通过水下航行器尾涡场后的声信号特性，探索新型水下航行器间接探测方法。

目前水下航行器涡流场的实测数据少且不易测量，特别是有军用价值的航行器，公开资料几乎没有。模型实验方法周期较长且成本较高。相比之下，数值模拟方法兼具成本和效率优势，可高效获取不同运动状态下的航行器尾涡。以潜艇为例，国内外学者针对潜艇尾涡进行过多次仿真研究：FUREBY<sup>[3]</sup>等人采用 LES 模型模拟全附体潜艇在直航和以 10°角偏航时涡流的形成以及变化，并和同等尺寸的模型试验对比，数值模拟和实验在流场有较好的一致性。LEONG 等<sup>[4]</sup>利用数值仿真方法研究不同附体配置的潜艇在偏航的流场变化。结果显示潜艇附体会增加尾涡尺寸。BROGLIA<sup>[5]</sup>使用数值方法对潜艇直航、俯仰以及偏航状态下的各附体产生的涡系展开了仿真研究，得到了不同运动状态下不同附体所产生涡的形态。ALIN 等<sup>[6]</sup>研究大涡模型模拟 Suboff 流动分离和马蹄涡结构，并与实验结果对比。黄璐<sup>[7]</sup>针对自由面干扰情况下潜艇尾涡进行了研究。王兴茹<sup>[8]</sup>利用数值仿真方法针对潜艇操纵运动下的远场的尾涡场进行了研究，得到了潜艇俯仰、偏航工况下的涡流场。叶金铭<sup>[9]</sup>使用 STAR-CCM+软件对全附体潜艇尾流场数值分析，结果表明：SST  $k-\omega$  模型较适合应用在潜艇模型尾流场计算。综上，在数值仿真方面，已有相对丰富的水下航行器尾涡场的流场研究，数值仿真方法可较为准确的模拟水下航行器的尾涡场，可为水下航行器尾涡场对声传播影响的研究提供流场数据。

在水下涡流场的声传播特性研究领域，国内外学者已经取得了一些研究成果。MANNEVILLE 等人<sup>[10]</sup>运用射线声学理论对水下涡流场进行了数值仿真，张咏鸥<sup>[11]</sup>基于摄动声学模型对水下涡流场声散射特性进行了研究。杜浩<sup>[12]</sup>针对水下低马赫数涡流场前向声散射建立了数值计算方法。王志鸿<sup>[13]</sup>基于射线声学理论研究了涡核特征半径、涡流场类型及马赫数等因素对涡声信号特征提取的影响。喻敏<sup>[14-15]</sup>模拟了声信号通过水下稳态涡流场的声线轨迹及信号变化，通过水池超声实验验证了水下稳态涡流场的数值模拟方法的有效性。王献忠<sup>[16]</sup>基于射线声学提出了求解涡声信号声压幅值的方法。但上述研究中，所采用的涡流场均是理想状态下的涡流场，鲜有研究针对实际环境中水下运动目标产生的涡流场声传播特性。

因此，为研究水下航行器运动时产生的涡流场的声传播特性，本文首先针对水下航行器尾涡场特性进行仿真研究。分析水下航行器尾涡场的尾涡结构。在此基础上，重点研究声信号在尾涡场中的传播特性，分析声波经过尾涡场后的相位变化规律，探讨水下航行器在不同运动姿态下尾涡场对声信号的影响。

## 1 水下航行器尾涡场仿真

### 1.1 数学模型与计算模型

本文针对水下航行器水下匀速航行时的尾涡场使用软件 Fluent 进行仿真运算，根据文献<sup>[9]</sup>选择二方程湍流模型 SST  $k-\omega$  模型进行计算。水下航行器模型选取全附体 Suboff 模型<sup>[17]</sup>，与实尺寸的比例为 1 : 24，模型长 4.356 m，艇身最大回转直径为 0.508 m，如图 1 所示。针对水下航行器的计算域，选择圆柱形流场进行非结构网格构建。具体计算域设置如图 2 所示，为了更好地捕捉水下航行器产生的尾涡，对图 2 中所示的区域进行网格加密处理。

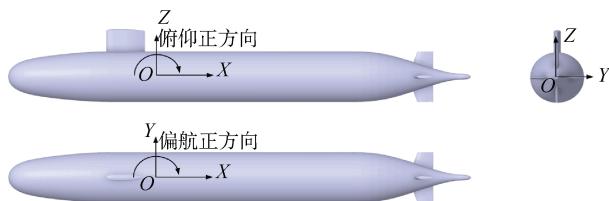


图 1 Suboff 模型  
Fig. 1 Suboff model

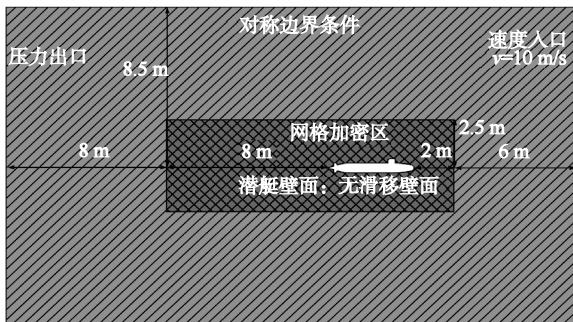


图 2 计算域设置

Fig. 2 Settings of computational domain

选择直航工况和偏航  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $-4^\circ$  工况以及俯仰偏航  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $-4^\circ$  进行计算研究。研究不同运动姿态下水下航行器的尾涡的流场特性。直航工况下计算域设置如图 2 所示, 对于偏航和俯仰工况, 将 Suboff 模型进行旋转后再进行网格划分, 旋转方向如图 1 所示。计算域设置同直航状态。

为消除因网格划分不同而产生的对数值计算结果的影响, 进行网格无关性验证。本文设置 4 种不同单元数目的网格进行无关性验证, 网格数目分别为 348 万、473 万、645 万、1 041 万。数值模拟 4 种网格密度下, Suboff 模型以 10 kn 航速直航时的阻力, 表 1 为 4 种网格密度下的数值计算结果。根据结果可以看出 4 种网格仿真计算的结果不存在较大差异, 这说明四者都能够精准计算出阻力值, 选择网格 3 方案作为仿真计算的网格方案。

表 1 网格无关性验证  
Table 1 Grid independence verification

网格	网格单元数/个	阻力/N
网格 1	348 万	285.4
网格 2	473 万	285.8
网格 3	645 万	285.4
网格 4	1 041 万	285.1

为了进一步验证数值计算的准确性, 将中纵面

上半缘线压力系数的仿真结果与实验值<sup>[18]</sup>进行对比。结果见图 3。

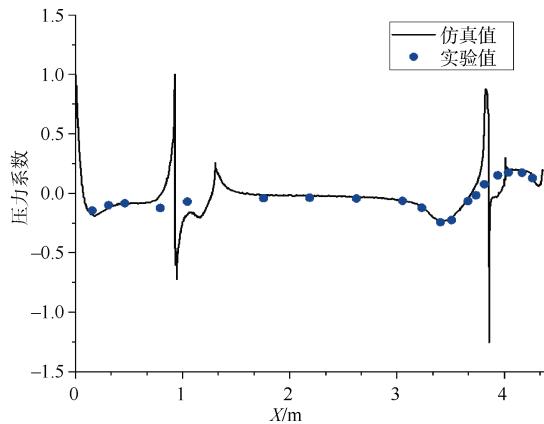
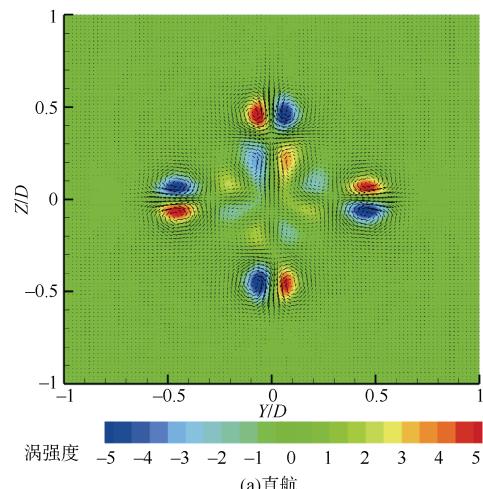


图 3 压力系数沿艇长的分布  
Fig. 3 Pressure coefficient along length

仿真结果与实验结果的压力系数分布趋势基本一致。水下航行器尾涡的产生与其表面的流动分离相关, 而流动分离会导致艇体表面的压力分布发生显著变化。通过对仿真结果与实验结果表面的压力分布, 进一步验证了水下航行器尾涡仿真结果的可靠性。

## 1.2 运动姿态对尾涡场的影响

基于数值仿真方法计算不同运动姿态下的尾涡场, 选取直航、偏航  $4^\circ$ 、俯仰  $4^\circ$  3 种运动姿态下的  $X/D=4$  处截面的尾涡场进行对比, 绘制其涡量图与速度矢量图, 如图 4 所示。由于水下航行器尾涡在向后扩散过程中, 强度减弱, 尺度变大, 涡形状基本不变<sup>[6]</sup>。因此本文后续水下航行器运动产生的尾涡场均指在水下航行器艇艉后  $X/D=4$  处截面的尾涡场, 此处涡强度较大, 有利于分析尾涡场的声传播特性, 其中  $X$  为距艇艉距离,  $D$  为水下航行器直径。



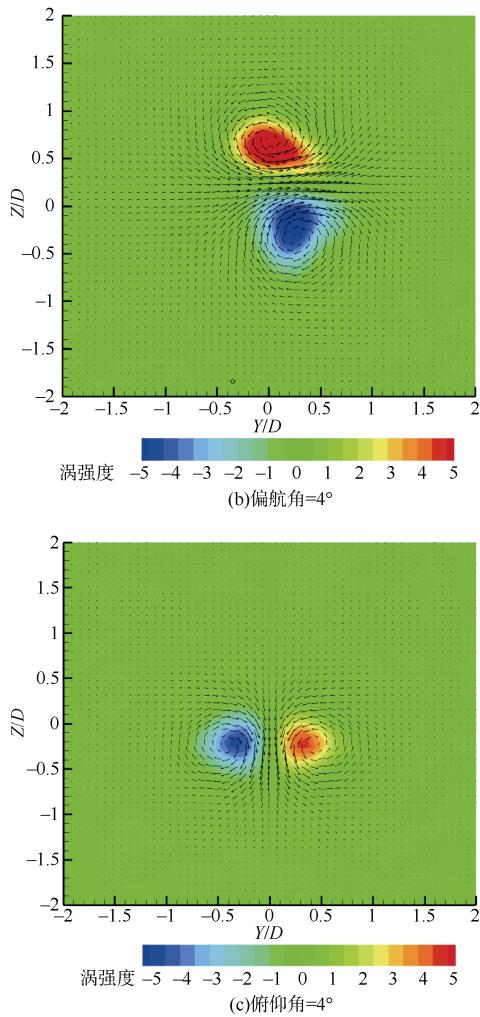


图 4 不同运动姿态下尾涡场涡量图与速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectors superimposed on contours of vorticity under different motion attitudes

由图 4 可看出, 水下航行器直航时, 艇艉尾涡场会存在多对涡, 每对涡中包含方向相反的涡, 整体分布形状近似十字形; 水下航行器偏航 4°时, 艇艉尾涡场会出现 2 个上下分布方向相反的涡, 此时两涡并没有很强的对称性, 这是因为水下航行器偏航时的艇身并不上下对称, 导致产生的尾涡也不对称; 水下航行器俯仰 4°时, 艇艉尾涡场会出现 2 个左右对称方向相反的涡, 这是因为水下航行器俯仰时的艇身左右对称, 产生尾涡也对称。此外, 对于水下航行器俯仰和偏航工况的尾涡场, 其两涡交汇处存在较大且指向某一方向的速度。

### 1.3 运动方向对尾涡场的影响

分析运动方向对水下航行器尾涡场的影响, 选取俯仰 4°, -4°与偏航 4°, -4°这 2 组运动角度相同时的尾涡场的仿真结果进行分析, 可得图 5 和图 6, 可以

看出水下航行器操纵运动方向相反时, 其尾涡场的形状和强度基本不变, 但尾涡旋转方向反转, 其位置也随水下航行器操纵运动方向的改变而改变。

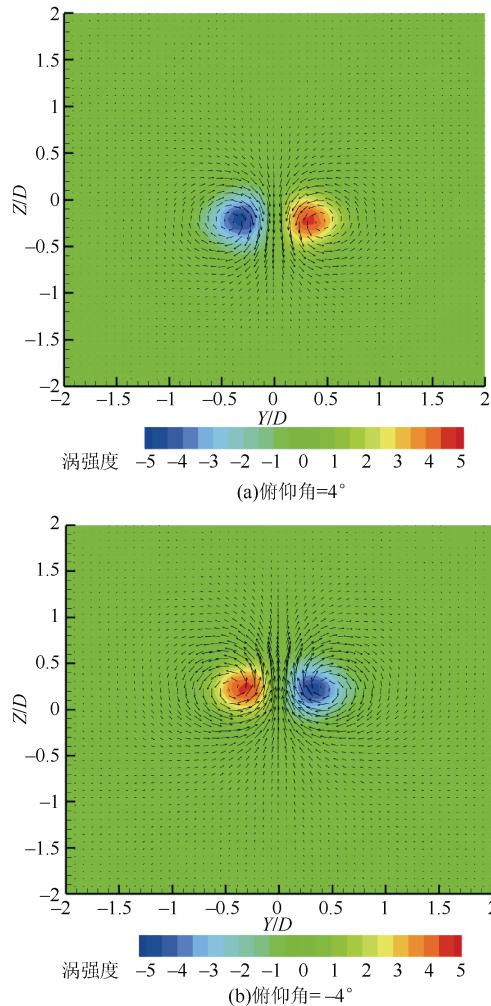
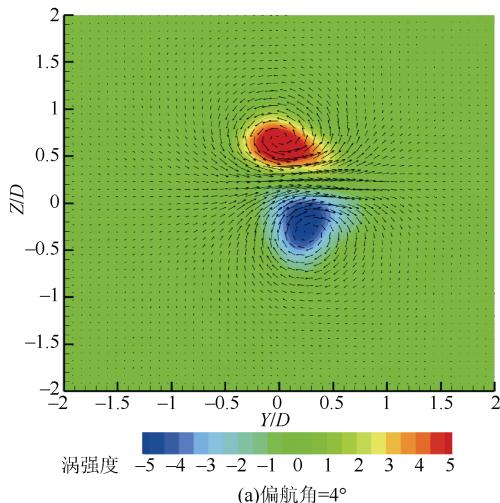


图 5 相反方向俯仰时尾涡涡量云图与速度矢量图

Fig. 5 Velocity vectors superimposed on contours of vorticity in opposite pitch direction



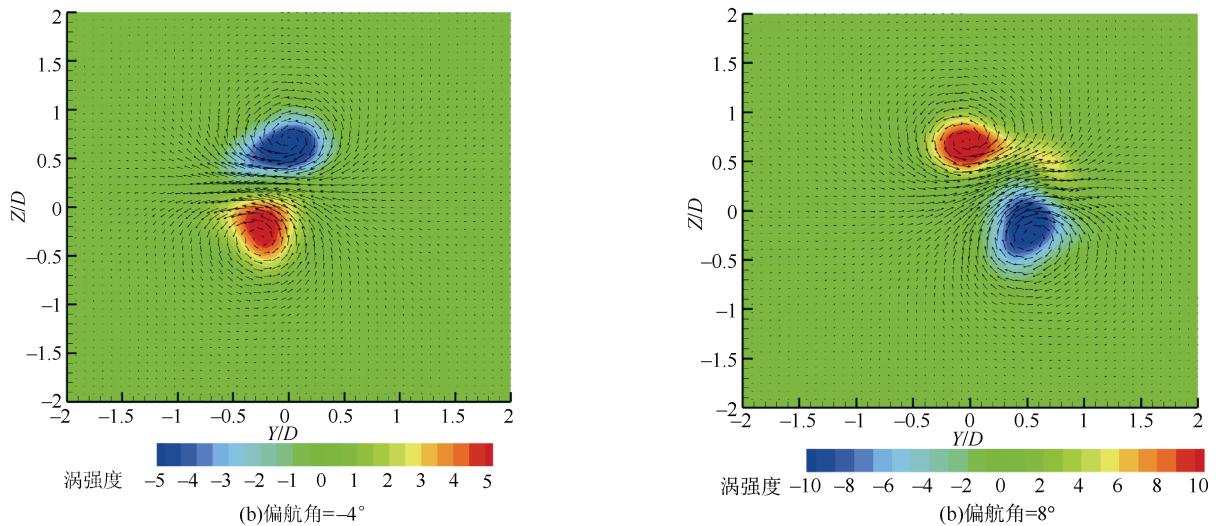


图 6 相反方向偏航时尾涡涡量云图与速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectors superimposed on contours of vorticity in opposite yaw direction

#### 1.4 运动幅度对尾涡场的影响

分析运动幅度对水下航行器尾涡场的影响,选取俯仰  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$  与偏航  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  这 2 组运动角度逐渐增大时尾涡场的仿真结果进行分析, 可得不同运动幅度下的水下航行器尾涡场, 如图 7 和图 8。

可以看出, 随着水下航行器运动幅度的增大, 尾涡场的强度与尺度也随之增大。尽管 7(c) 中出现了 3 个涡量区, 但是从速度矢量可以看出还是只存在 2 个涡结构, 运动幅度的大小对水下航行器尾涡的分布规律无显著影响。

综上所述, 水下航行器在不同工况下, 水下航行器尾涡场与水下航行器的运动姿态、水下航行器的运动角度方向和大小有关。水下航行器运

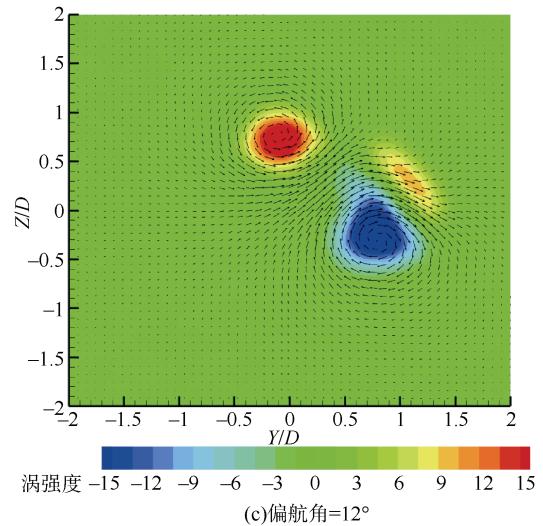
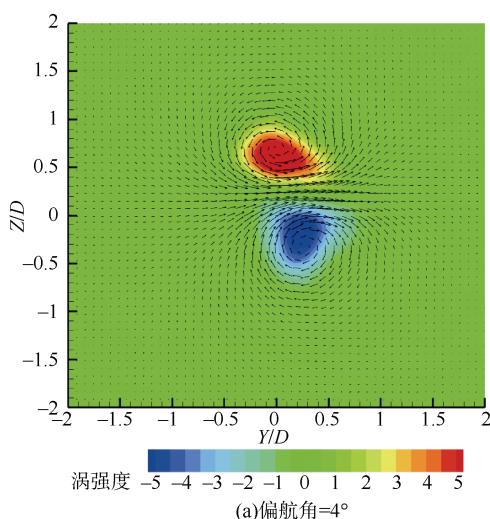
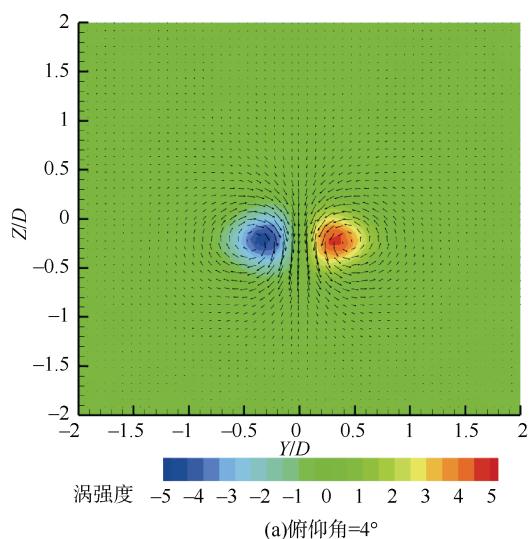


图 7 不同角度偏航时尾涡涡量云图与速度矢量图

Fig. 7 Velocity vectors superimposed on contours of vorticity at different yaw angles



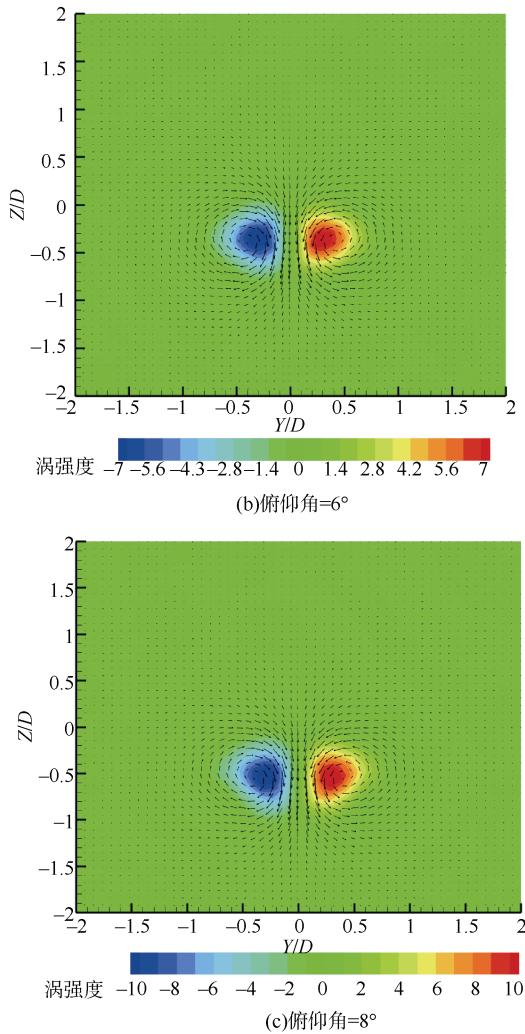


图 8 不同角度俯仰时尾涡涡量云图与速度矢量图

Fig. 8 Velocity vectors superimposed on contours of vorticity at different pitch angles

动姿态决定尾涡场的形态与分布规律，水下航行器运动角度影响尾涡场强度、尺度和方向，但对水下航行器尾涡场的基本分布形式影响不大。因此根据水下航行器尾涡形状反映了水下航行器运动姿态，是一种可行的判断水下航行器工况的尾迹特征。

## 2 水下航行器尾涡的声信号相位特性分析

### 2.1 通过涡流场声波传播特性

涡流场中流的运动对声的传播会产生减速或加速的影响。假设流场中存在一点速度为  $\mathbf{u}$ ，当声波到达此点的时候，声波的传播速度会受到介质自身也就是流场的速度的影响，当声波沿  $x$  轴正方向

传播时，声波在此点的速度变为  $c + \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_x$ ， $c$  为声速， $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_x$  为流场速度在  $x$  方向上的投影。当声速在流场中发生改变时，其传播时间也会改变。如图 9 所示，入射声波在经过涡流场后，其声波的传播受到涡流场的影响，由此改变了接收阵列接收信号的相位，产生相位跳变。

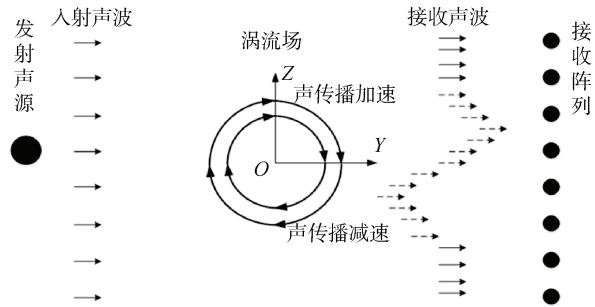


图 9 声波通过涡流场示意图

Fig. 9 Propagation of sound waves through vortex field

流场对声信号速度的这种改变在其传播路径上进行叠加可以得到如下公式。通过涡流场等运动介质的声信号相位差定义式为

$$\phi = \omega \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{(c + \mathbf{u}(s) \cdot \mathbf{n})} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{n}$  为发射声信号的方向矢量； $\mathbf{u}$  为涡流场中的速度矢量； $\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{(c + \mathbf{u}(s) \cdot \mathbf{n})}$  为声信号从发射点  $s_1$  到接收点  $s_2$  的时延量； $\omega$  为圆频率； $\phi$  为  $s_1$  点到  $s_2$  点的相位变化量。

根据上节仿真数据获取水下航行器尾涡的速度场  $\mathbf{u}$ ，可计算声波通过不同运动姿态下的水下航行器尾涡场的声信号相位。

### 2.2 仿真计算

仿真中，声波频率设置为 10 kHz。在实际计算中直接积分求取时延量过于困难，所以采取离散算法进行计算。为保证计算精度，1 个波长距离范围内应至少包含 10 个计算点，则空间离散时  $\Delta x$  设置为  $\Delta x = 0.01$  m ( $\lambda = 0.15$  m)。

首先采用垂直线列阵进行仿真，如图 10 所示，声源在  $(0, -R/2, 0)$  设置，接收阵列长度为  $L=R$ ，设置在  $ZOY$  平面内，阵列距离原点  $R/2$ ， $R=4D$ 。声波传播方向为  $Y$  轴正方向。

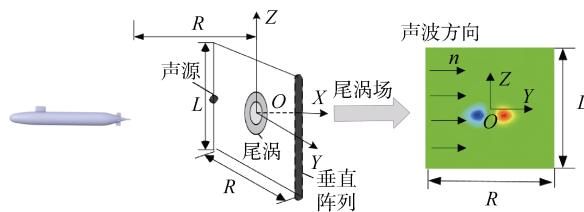


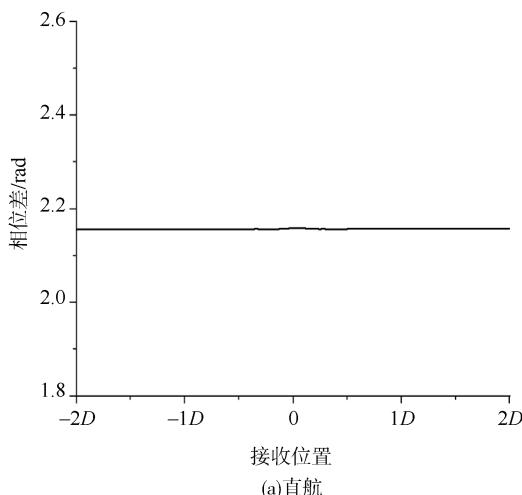
图 10 垂直线列阵示意图

Fig. 10 Schematic diagram of vertical array

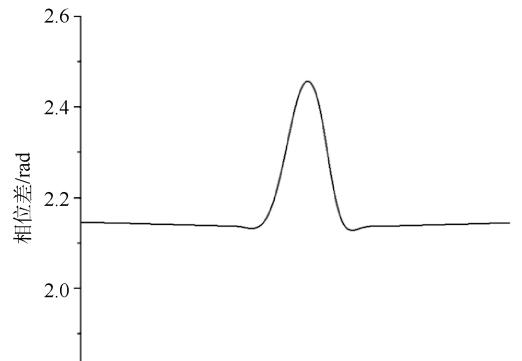
根据计算设置, 计算声波通过直航、偏航  $4^\circ$ 、俯仰  $4^\circ$  工况下的尾涡后不同接收位置处的相位差曲线, 结果如图 11 所示。

图 11 (a) 和 (c) 中, 声波通过水下航行器直航与俯仰尾涡场时接收阵相位差无明显变化, 因为在这 2 种工况下, 尾涡场关于 Z 轴对称且方向相反, 导致各涡对的速度场中的速度  $\mathbf{u}$  在  $\mathbf{n}$  上的投影会互相抵消。图 11 (b) 中接收阵的声相位曲线跳变明显, 这是因为水下航行器偏航工况下尾涡场在两涡交汇处中存在较大的  $\mathbf{u}$ , 且此时此速度  $\mathbf{u}$  方向与声传播方向近似同向, 对声信号具有较强的加速作用, 产生明显的相位跳变。

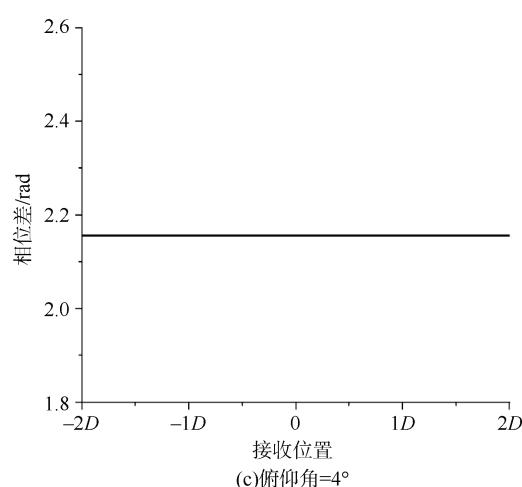
改变偏航角度, 进一步探讨偏航角度与相位跳变之间的关系, 对偏航  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  工况的尾涡场进行仿真得图 12, 对偏航  $4^\circ$ ,  $-4^\circ$  工况的尾涡场进行仿真得图 13。根据图 12 不难发现, 当尾涡强度随着水下航行器偏航角度变化而增强时, 相位跳变的峰值也会随之变大。因为涡强度增加时, 速度  $\mathbf{u}$  也会增强, 对声的加速或减速作用会增强, 所以峰值的大小和涡的强度有关系, 涡强度越大, 相位跳变峰值越大。



(a) 直航



(b) 偏航角=4°



(c) 俯仰角=4°

图 11 垂直阵探测不同运动姿态的水下航行器的尾涡场声信号相位差曲线

Fig. 11 Acoustic signal phase difference curve when vertical array detecting underwater vehicle wake vortices with different motion attitudes

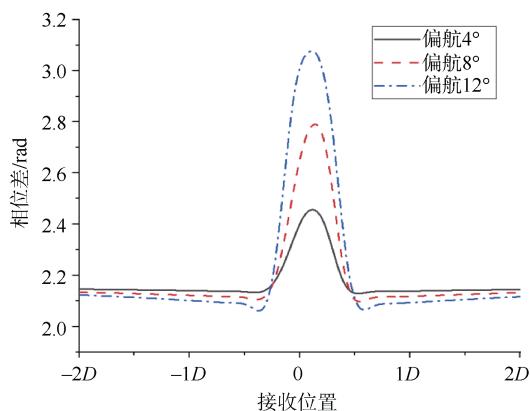


图 12 垂直阵探测偏航工况下不同角度的尾涡场声信号相位差曲线

Fig. 12 Acoustic signal phase difference curve when vertical array detecting underwater vehicle wake vortices at different yaw angles

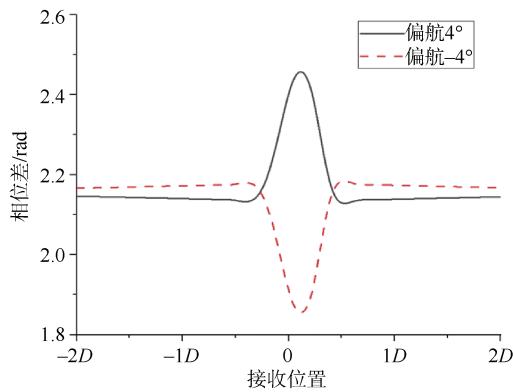


图 13 垂直阵探测偏航工况下相反方向的尾涡场声信号相位差曲线

Fig. 13 Acoustic signal phase difference curve when vertical array detecting underwater vehicle wake vortices in opposite yaw direction

而在图 13 中, 相位跳变的峰值的方向随着偏航方向的改变而改变。其原因可从图 6 中可以看出, 当偏航方向改变时, 尾涡旋转方向因为水下航行器偏航角度改变而反转时, 速度  $\mathbf{u}$  的方向也会反转, 最终造成相位跳变峰值的方向随之改变。

因为采用垂直线列阵对水下航行器直航状态和俯仰状态的尾涡场探测时无相位跳变现象, 因此采用水平线列阵对 2 种运动姿态的尾涡场进行仿真。水平线列阵的布置形式如图 14 所示。

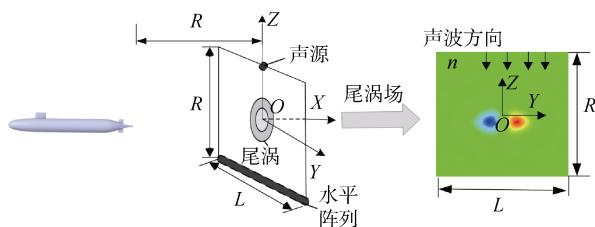


图 14 水平线列阵示意图

Fig. 14 Schematic diagram of horizontal array

除布置形式不同, 声传播方向沿 Z 轴负方向。其他参数与图 10 的垂直线列阵布置参数相同。基于此仿真设置, 计算通过直航、俯仰 4°工况下的尾涡后不同接收位置处的相位差曲线, 结果如图 15 所示。

由图 15 (a) 可知, 声波通过水下航行器直航工况下的尾涡, 没有明显的相位跳变现象, 这是由于声波依次穿过多个方向相反且成对的涡, 对声传播影响会相互抵消, 造成接收声信号相位跳变不

大; 图 15 (b) 中接收阵的声相位曲线跳变明显, 这是由于水下航行器俯仰工况下的尾涡场在两涡交汇处中存在较大的  $\mathbf{u}$ , 且此速度  $\mathbf{u}$  方向与声传播方向同向, 对声信号具有较强的加速作用, 由此产生明显的相位跳变。

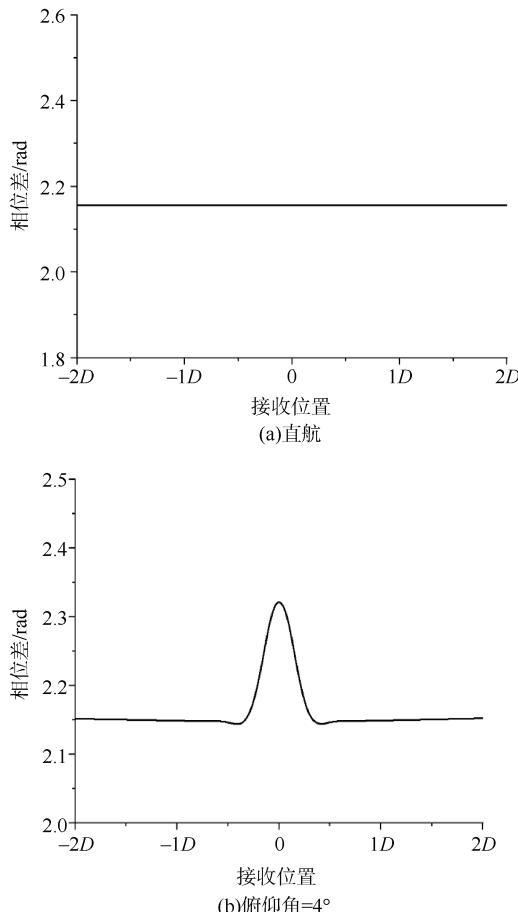


图 15 水平线列阵探测不同运动姿态水下航行器的尾涡场声信号相位差曲线

Fig. 15 Acoustic signal phase difference curve when horizontal array detecting underwater vehicle wake vortices with different motion attitudes

综上分析, 因为不同工况下尾涡场的分布不同, 使用垂直线阵列和水平线阵列对水下航行器不同运动状态下的尾涡场进行探测时, 其产生的结果也是不同的。直航状态下的尾涡场, 因为其对称性暂时无法被探测, 偏航状态下的尾涡场采用垂直线阵列方法进行探测可以获得明显的相位跳变。水下航行器做俯仰运动时, 采用水平线阵列方法进行探测可以获得明显的相位跳变。相位跳变峰值大小与涡的强度与尺寸有关。

### 3 结束语

本文针对水下航行器产生的尾涡进行模拟, 研究其声信号特性, 初步探讨了基于目标尾涡特征的水下目标间接探测技术的可行性。以全附体 Suboff 模型为研究对象, 采用数值模拟方法计算了水下航行器在不同工况下的尾涡场。通过对不同种工况下的尾涡场的分析与对比, 直观地给出了水下航行器的工况对尾涡场的影响规律。针对常见的水平线阵列和垂直线阵列, 对通过尾涡场进行声信号相位进行研究。研究结果如下:

1) 当水下航行器以不同工况航行时, 对于每种工况, 尾涡场的分布形式由运动姿态所决定, 而尾涡场中的强度与尺寸和运动幅度有关。

2) 当水下航行器做直航运动时, 使用垂直线阵列和水平线阵列方法的探测结果均不明显。作偏航运动时, 采用垂直线阵列方法进行探测可以获得明显的相位跳变。当水下航行器做俯仰运动时, 采用水平线阵列方法进行探测可以获得明显的相位跳变。

3) 水下航行器的尾涡结构具有复杂性, 其尾涡场的分布特征、强度及尺寸等流场特性均受航行器运动状态的影响, 而不同的流场特性会产生不同声信号相位特征。

由本文研究可知, 水下航行器的尾涡对声信号相位的影响与艇体的运动状态存在一定的关联。但由于水下航行器尾涡结构复杂, 难以通过常规手段对将声信号特征与艇体运动状态进行关联, 在后续的研究中, 可通过神经网络等方法研究基于水下航行器尾涡的目标识别方法。

### 参考文献

- [1] 何心怡, 程善政, 卢军, 等. 国外水下涡流探测技术研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(1): 1-5.
- [2] ROUX P, DEROSNY J, TANTER M, et al. The aharonov-bohm effect revisited by an acoustic time-reversal mirror[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(17): 3170.
- [3] FUREBY C, ANDERSON B, CLARKE D, et al. Experimental and numerical study of a generic conventional submarine at 10° yaw[J]. Ocean Engineering, 2016, 116: 1-20.
- [4] LEONG Z, PICCOLIN S, DESJUZEUR M, et al. Evaluation of the out-of-plane loads on a submarine undergoing a steady turn[C]// 20th Australasian Fluid Mechanics Conference ( 20AFMC ). Perth: IEEE, 2016.
- [5] BROGLIA R, POSA A, BETTLE M C. Analysis of vortices shed by a notional submarine model in steady drift and pitch advancement[J]. Ocean Engineering, 2020, 218: 108236.
- [6] ALIN N, FUREBY C, SVENNBERG U, et al. Large eddy simulation of the transient flow around a submarine during maneuver[C]// 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] 黄璐. 潜艇近水面航行空间演化分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [8] 王兴茹. 潜艇尾流空间演化及流场特性仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [9] 叶金铭, 张凯奇, 于安斌. 基于 STAR-CCM+ 的全附体潜艇尾流场数值分析[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(4): 53-58.
- [10] MANNEVILLE S, ROBRES J H, MAUREL A, et al. Vortex dynamics investigation using an acoustic technique[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(11): 3380-3389.
- [11] 张咏鸥, 张涛, 李天匀. 基于摄动声学模型的涡流场声散射特性研究[C]// 2016 年度声学技术学术会议论文集. 北京: 中国声学学会, 2016: 231-235.
- [12] 杜浩, 熊鳌魁, 张咏鸥. 水下涡流场前向声散射特性分析[J]. 声学学报, 2020, 45(1): 55-61.
- [13] 王志鸿. 基于射线声学的涡声耦合声信号数值仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [14] 喻敏, 樊丁繁, 张烨, 等. 水下稳态涡流场声传播的数值模拟和实验研究[J]. 声学技术, 2023, 42(4): 419-425.
- [15] 喻敏, 闫婧洁, 王志鸿, 等. 水下稳态涡流场声传播特性[J]. 声学学报, 2023, 48(6): 1111-1118.
- [16] 王献忠, 罗传增, 喻敏, 等. 通过稳态涡流场的声信号数值模拟与分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2024, 52(10): 78-84.
- [17] GROVES N C, HUANG T T, CHANG M S. Geometric characteristics of DARPA Suboff models, ADA210642[R]. Bethesda: David Taylor Research Center, 1989.
- [18] LIU H L, JIANG C W, FRY D J, et al. Installation and pretest analysis of DARPA Suboff model in the DTRC anechoic wind tunnel, ADA221497[R]. Bethesda: David Taylor Research Center, 1990.

(责任编辑: 张曼莉)