

文章编号: 1007-7294(2024)11-1633-10

内孤立波中潜水器纵向运动特性 数值仿真研究

刘 乐^{1,2}, 姚志崇^{1,2}, 冯康佳^{1,2}, 胡芳琳^{1,2}

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 海洋中内孤立波会诱发突变的环状剪切流, 导致潜水器产生大幅度的垂向掉深和俯仰运动, 给潜水器航行安全和作业性能带来威胁。本文基于CFD的速度入口造波法和重叠网格技术, 建立内孤立波中潜水器运动响应预报方法, 通过与分层流水池试验结果对比, 证明该方法可准确模拟内孤立波中潜水器大振幅运动; 通过对处于分层界面的无动力悬浮潜水器在内孤立波中的运动过程模拟分析, 揭示内孤立波中潜水器掉深及俯仰运动产生机理, 同时探究分层厚度比、波幅、潜深等参数对无动力悬浮潜水器纵向运动的影响规律。结果表明: 潜水器在内孤立波中的掉深和俯仰运动幅值是由内孤立波波幅和最大波倾角决定; 波幅、分层厚度比、潜深等因素对潜水器纵向运动特性有较大影响。

关键词: 内孤立波; 纵向运动; 掉深; 俯仰; 波倾角

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.11.001

Numerical simulation of longitudinal motion property of submersibles under internal solitary waves

LIU Le^{1,2}, YAO Zhi-chong^{1,2}, FENG Kang-jia^{1,2}, HU Fang-lin^{1,2}

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China)

Abstract: Abrupt annular shear flows induced by internal solitary waves will cause submersibles to produce a large depth drop and pitch motion, threatening the safety and operation performance of submersibles. Based on the velocity inlet wave generation method and overset grid technique of CFD, the motion response prediction method of submersibles in internal solitary wave was established. With the prediction results compared with the experimental results, it is proved that the method can accurately simulate the large amplitude motion of submersibles in internal solitary waves. Through the simulation analysis of motion process of unpowered floating submersibles at the stratified interface under the action of internal solitary waves, the mechanism of depth drop and pitch motion of submersibles in internal solitary waves was revealed, and the effects of stratified thickness ratio, wave amplitude and depth of navigation on the longitudinal motion of unpowered floating submersibles were investigated. The results show that the amplitude of depth drop and pitch of the submersibles in internal solitary waves were determined by the wave amplitude and the maximum slope of wave sur-

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779232)

作者简介: 刘 乐(1990-), 男, 硕士, 工程师, 通讯作者, E-mail: 773630954@qq.com;

姚志崇(1980-), 男, 博士, 研究员。

face; The factors such as amplitude, stratified thickness ratio and depth of navigation have great influence on the longitudinal motion property of submersibles.

Key words: internal solitary wave; longitudinal motion; depth drop; pitch; slope of wave surface

0 引言

海洋中普遍存在温盐密稳定层化现象,在潮汐与海底崎岖地形相互作用下,易于在水下激发生成强非线性内孤立波。海洋中内孤立波振幅大,穿越时间长,影响范围广,常见波长为几百米至几千米,穿越时间为几分钟至几十小时不等,最大振幅超过百米。除此之外,内孤立波影响的垂向深度也极深,海上实测结果显示,水下100~600 m是内孤立波主要影响区域,千米深度依然受内孤立波影响。内孤立波诱导的流场呈环形剪切流状,波面上方和下方、波峰/谷左侧与右侧流动方向相反。潜水器通过内孤立波过程中,在突变剪切流以及密度差耦合作用下,会产生大幅掉深及大角度俯仰运动,极大威胁到潜水器的航行安全性和作业性能,因此探究内孤立波作用下潜水器的掉深与俯仰运动产生机理以及影响规律具有工程实际意义。

有关内孤立波与水下结构物约束模相互作用的研究,在数值和实验方法上已取得大量成果。魏岗与杜辉等^[1-2]在分层流内波试验水池中开展细长体模型的内波载荷测量试验,并与数值模拟结果进行了比较,验证了内孤立波载荷数值模拟方法;武军林^[3]运用重力式分层流水槽开展横置细长潜体遭遇内孤立波的流场和作用力特性实验,发现潜体所受水平作用力主要由内孤立波诱导流场决定,垂向作用力由内孤立波引起的密度场和流场变化的耦合作用决定;关晖^[4]和黄苗苗^[5]采用数值方法模拟SUBOFF约束模型穿越内孤立波时的流场形态和受力载荷特性,研究表明SUBOFF在穿越内孤立波时会引起波面大幅变形并伴随局部破碎,其受力、力矩会发生陡变,可能使潜艇发生倾覆。

约束模研究可以阐释潜水器通过内孤立波时的载荷变化历程,但并不能完全揭示潜水器受内孤立波持续作用下的运动机理,目前关于内孤立波作用下潜水器运动响应研究较少。陈杰等^[6]尝试运用动网格方法,对遭遇内孤立波的潜水器模型水平和垂向运动分别进行单自由度运动模拟,仅给出了潜水器运动趋势,未考虑潜水器垂荡、纵荡及俯仰运动的耦合作用;杨帆^[7]基于商用软件ANSYS,利用动网格技术,数值模拟了裸艇体潜器与内孤立波相互作用的三自由度运动响应,发现潜器在通过内孤立波过程中会发生垂荡、纵荡和俯仰运动,但其并未考虑围壳及舵翼等附体的影响,导致潜器运动响应的数值模拟结果偏大,且缺乏试验数据验证;刘乐^[8]采用商业软件模拟了内孤立波作用下不同初始潜深的SUBOFF的运动响应过程,分析了不同初始潜深的潜水器的掉深和失稳规律。

本文基于CFD软件,运用速度入口造波方法,依据eKdV理论生成内孤立波,采用重叠网格技术和VOF方法模拟处于分层界面及以下潜水器的运动响应,并将数值仿真结果与试验结果进行比较,验证数值仿真方法的可靠性。然后详细分析处于分层界面的无动力悬浮潜水器在内孤立波作用下的运动过程,揭示潜水器在内孤立波作用下的掉深及俯仰运动产生机理,在此基础上分析分层厚度比、波幅、潜深等因素对内孤立波中无动力悬浮潜水器纵向运动响应的影响规律,为进一步评估内波作用下潜水器航行安全性提供理论支撑。

1 潜水器运动响应数值模拟

1.1 数值水池介绍

内孤立波数值水池示意图如图1所示,建立直角坐标系 $oxyz$,使 oxy 平面位于未扰动分层界面上,坐标系原点 o 位于分层界面与入口边界交点, x 轴沿分层界面向右为正方向, z 轴垂直向上为正方向, y 轴正方向依据右手坐标系确定。采用两层流模型,上层为低密度流体,密度为 ρ_1 ,层厚为 h_1 ;下层为高

密度流体,密度为 ρ_2 ,层厚为 h_2 ,内孤立波波幅为 a 。水池前段为造波区域,中段为工作区域,后段为消波区域,内孤立波沿 x 轴正方向传播,计算模型轴线距分层界面的距离为 d 。

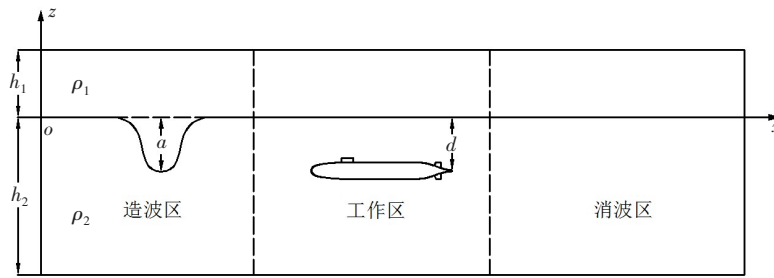


图1 内孤立波数值水池示意图

Fig.1 Schematic diagram of numerical wave tank of internal solitary wave

1.2 内孤立波理论模型

根据内孤立波 eKdV 理论^[9],内孤立波波面表达式为

$$\eta = \frac{a}{B + (1 - B)\cosh^2\left(\frac{x - ct}{\lambda}\right)} \tag{1}$$

$$c = c_0 + \frac{a}{3}\left(c_1 + \frac{1}{2}c_3a\right) \tag{2}$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{gh_1h_2(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1h_2 + \rho_2h_1}} \tag{3}$$

$$c_1 = -\frac{3c_0}{2} \frac{\rho_1h_2^2 - \rho_2h_1^2}{\rho_1h_1h_2^2 + \rho_2h_2h_1^2} \tag{4}$$

$$c_2 = \frac{c_0}{6} \frac{\rho_1h_2h_1^2 + \rho_2h_1h_2^2}{\rho_1h_2 + \rho_2h_1} \tag{5}$$

$$c_3 = \frac{7c_1^2}{18c_0} - \frac{c_0(\rho_1h_2^3 + \rho_2h_1^3)}{h_1^2h_2^2(\rho_1h_2 + \rho_2h_1)} \tag{6}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{24c_2}{a(2c_1 + c_3a)}} \tag{7}$$

$$B = \frac{-ac_3}{2c_1 + ac_3} \tag{8}$$

式中: η 为内孤立波波面升高值; a 为内孤立波波幅; λ 为表征内孤立波特征长度的物理量,整个波形基本包含于约 4λ 的长度范围内; c 为内孤立波传播的相速度; c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为线性项、一阶非线性项、色散项、二阶非线性项系数; g 为重力加速度,9.81 m/s²。

在此基础上,进一步推导出上下层流体中的平均水平速度表达式:

$$U_1 = -c \frac{\eta}{h_1 - \eta} \tag{9}$$

$$U_2 = c \frac{\eta}{h_2 + \eta} \tag{10}$$

式中, U_1 为上层流体平均水平速度, U_2 为下层流体平均水平速度。

1.3 流体控制方程

本研究以时均连续性方程和RANS方程为基本控制方程,时均连续性方程具体形式如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{11}$$

RANS 方程具体形式如下：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \tag{12}$$

式中, ρ 是流体密度, μ 是流体粘度, p 是静水压力, S_i 为质量力, u_i, u_j 是速度分量。

1.4 计算模型

计算模型采用 SUBOFF 缩比模型, 如图 2 所示, 其主要参数见表 1。



图 2 SUBOFF 三维缩比模型

Fig.2 Three-dimensional scaled model of SUBOFF

表 1 SUBOFF 模型主要参数

Tab.1 Main parameters of the SUBOFF model

参数名称	符号/单位	数值	参数名称	符号/单位	数值
艇长	L/m	1	横摇惯性半径	K_{xx}/m	0.045
艇径	D/m	0.117	纵摇惯性半径	K_{yy}/m	0.289
全附体排水体积	∇/dm^3	8.539			

1.5 仿真参数设置

数值水池顶部和底部设置为滑移壁面边界, 右侧边界的边界条件为压力出口, 其它边界的边界条件为速度入口, 入口速度函数表达式见公式(9)和(10)。分层界面采用 VOF 法捕捉, 消波方式采用阻尼消波。模型允许垂荡、纵荡和俯仰三个自由度, 采用重叠网格技术模拟大振幅运动。湍流模型采用可实现 $k-\epsilon$ 模型, 通过二阶隐式不定常求解器求解, 求解时间步长为 0.01 s。采用切割体网格进行划分, 在分层界面、模型表面以及模型运动区域进行加密处理, 如图 3 所示。

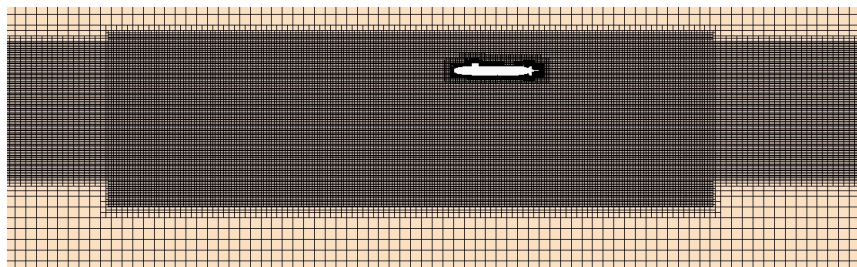


图 3 SUBOFF 模型网格加密

Fig.3 Mesh refinement of SUBOFF model

1.6 数值仿真方法验证

为了验证数值仿真方法的准确性, 在中国船舶科学研究中心分层流水池中开展内孤立波中 SUBOFF 缩比模型运动响应水池试验。分层流水池见图 4, SUBOFF 运动响应水池试验场景见图 5, 分层流水池是采用溃坝式方法生成内孤立波; 试验开始之前, 通过压铁块配重和移位来调节模型的重量和重心位置使其悬浮在不同深度的水层中; 试验过程中, 通过相机拍摄模型在内孤立波作用下的运动过程及姿态变化, 通过图像处理获取模型的位移和姿态角随时间变化曲线。



图4 分层流水池

Fig.4 Stratified flow test tank

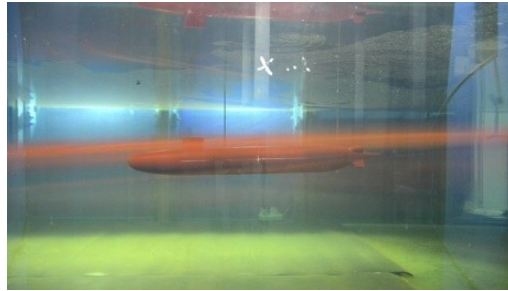


图5 内孤立波中SUBOFF模型运动响应水池试验

Fig.5 Motion test of SUBOFF model under internal solitary waves

典型试验工况有两种：模型刚好处于分层界面，内孤立波波幅 $a=0.12\text{ m}$ ；模型处于分层界面下方，模型轴线与分层界面间的距离 $d=0.18\text{ m}$ ，内孤立波波幅 $a=0.1\text{ m}$ 。以上两种试验工况，分层流水池分层参数相同，上层层深 $h_1=0.208\text{ m}$ ，密度 $\rho_1=998\text{ kg/m}^3$ ，下层层深 $h_2=0.578\text{ m}$ ，密度 $\rho_2=1020\text{ kg/m}^3$ 。数值计算采用与分层流水池相同工况展开仿真模拟，数值水池总长度为 19 m ，其中造波区长度为 6 m ，工作区长度为 5 m ，消波区长度为 8 m ，水池宽度为 3.5 m ；消波区内采用阻尼消波，通过监测内孤立波波面，显示出口附近波面升高基本为零，消波效果良好。数值计算结果与模型试验结果如图6和图7所示。

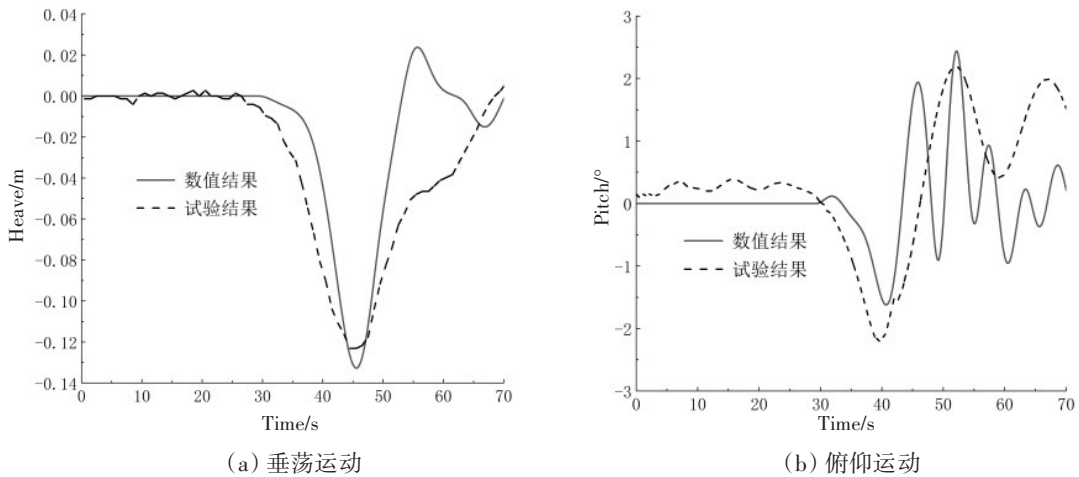


图6 处于分层界面工况潜水器运动响应对比

Fig.6 Comparison of motion responses of submersibles on the stratified interface condition

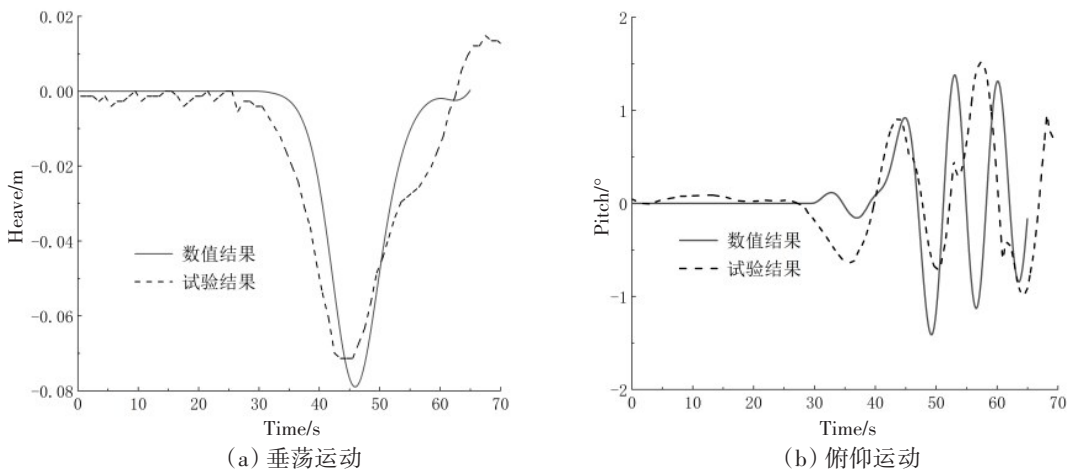


图7 处于分层界面下方工况潜水器运动响应对比

Fig.7 Comparison of motion responses of submersibles under the stratified interface condition

数值仿真和水池试验中两种工况垂荡和俯仰运动趋势基本一致。模型刚好处于分层界面的垂荡运动幅值数值结果比试验结果偏大7.8%，俯仰运动幅值数值结果比试验结果偏小19%；模型处于分层界面下方的垂荡运动幅值数值结果比试验结果偏大10.6%，俯仰运动幅值数值结果比试验结果偏大25.6%。由上可以看出，两种典型工况下数值仿真预报的运动响应误差均在可接受范围内，说明建立的内孤立波作用下潜水器运动响应数值预报方法是可靠的。

2 潜水器掉深及俯仰运动机理分析

潜水器在内孤立波作用下的运动受内孤立波诱导流场的水动力以及密度差静力共同影响，文中通过数值模拟潜水器处于分层界面处的典型工况来分析潜水器掉深及俯仰运动产生机理。为了反映真实海洋中内孤立波作用下潜水器的运动，数值水池中内孤立波分层参数和波幅参考实测数据^[10]，计算模型采用SUBOFF缩比模型，内孤立波参数如下： $h_1=0.8\text{ m}$ ， $\rho_1=1000\text{ kg/m}^3$ ， $h_2=5\text{ m}$ ， $\rho_2=1020\text{ kg/m}^3$ ， $a=0.75\text{ m}$ 。

2.1 波形及流场分析

数值模拟的下凹型内孤立波如图8所示，出口处波面升高为零，未见反射波，消波效果良好。由图9可以看出，内孤立波诱导的流场为顺时针运动的椭圆形，波面为分界面，上层与下层的水平流速方向相反，上层的水平流速与内孤立波传播方向一致，而下层的水平流速与内孤立波传播方向相反，上层流体流速大于下层流体。内孤立波的垂向速度以波谷为分界，波谷左侧流速方向向上，右侧向下，左右两侧流速大小相当。

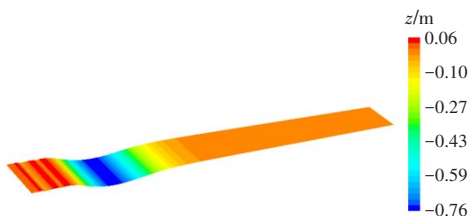


图8 内孤立波的波形云图
Fig.8 Contour map of wave surface

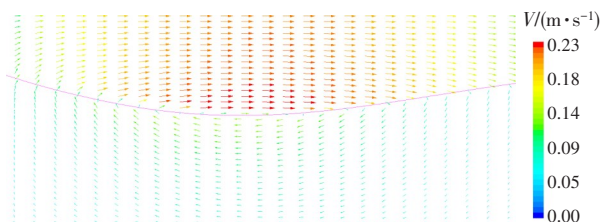


图9 内孤立波速度场
Fig.9 Velocity field of internal solitary wave

2.2 典型工况下潜水器运动分析

图10是处于分层界面潜水器在内孤立波中的运动响应曲线，图11是特定时刻的潜水器速度矢量图。当内孤立波传播至模型时，诱导的垂向速度向下，同时分层界面开始下凹，因此在水动力和密度差静力的作用下，模型开始船倾、掉深，35 s时模型船倾角达到最大值6.5°，之后模型继续掉深，41 s时模型掉深达到最大值-0.743 m，此时模型刚好处于波谷处，内孤立波诱导的速度为水平方向，俯仰角接近于0°；内孤立波波谷通过模型后，诱导的垂向速度向上，模型开始上浮、艇倾，47.3 s时模型艇倾角

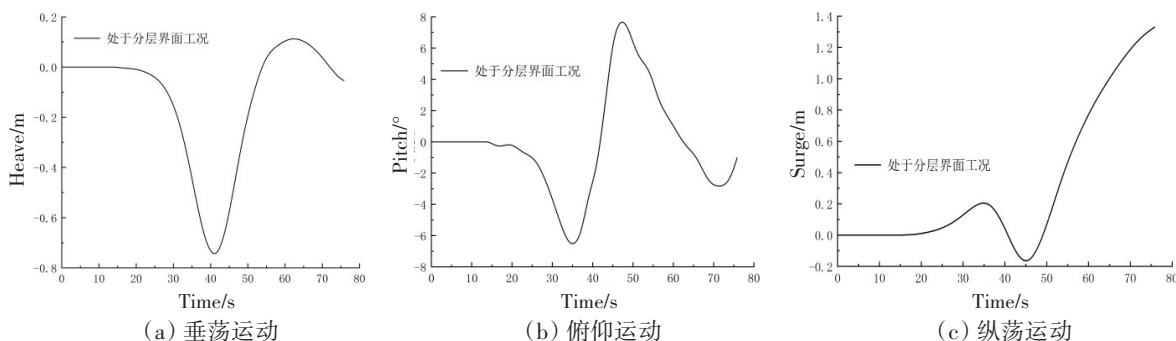


图10 处于分层界面工况潜水器运动响应曲线

Fig.10 Motion response of submersibles on stratified interface condition

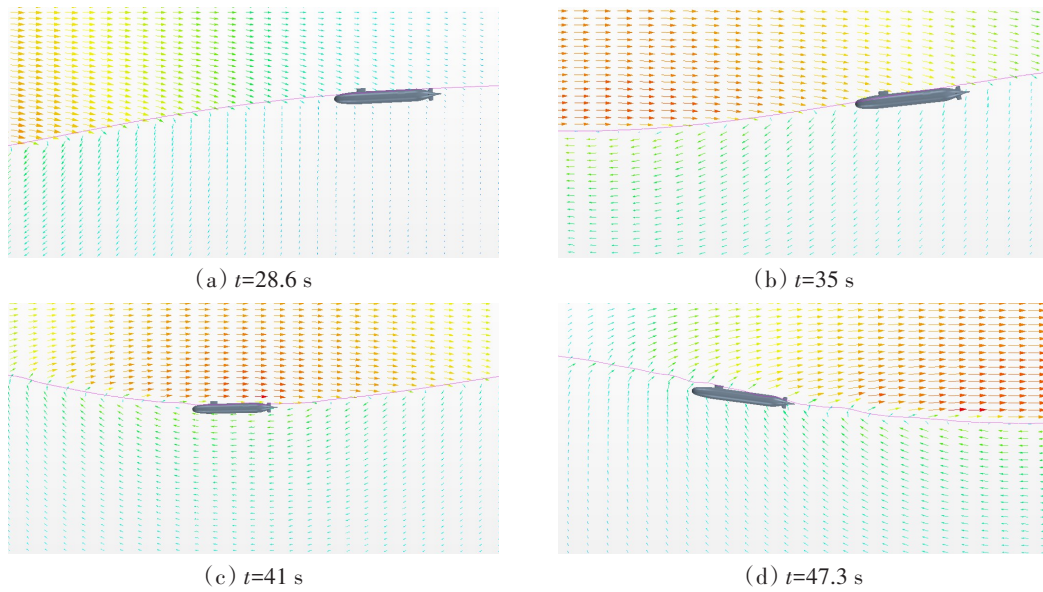


图 11 处于分层界面工况潜水器特定时刻速度矢量图

Fig.11 Velocity vector of submersibles on stratified interface condition at a given time

达到最大值 7.6° ，模型继续上浮，53.8 s 后内孤立波主波通过模型。之后模型在内孤立波尾波作用下，围绕平衡位置上下震荡，运动幅值较小。由图 11 可以看出，内孤立波通过模型过程中，模型始终处于分层界面，内孤立波波幅为 0.75 m，与模型最大垂荡幅值相当，同时内孤立波的最大波倾角约为 8.95° ，大于模型的俯仰运动幅值。由此可认为处于分层界面潜水器的垂荡幅值和俯仰运动幅值由内孤立波波幅及最大波倾角决定，也可说明处于分层界面潜水器在内孤立波中的运动受密度差静力影响远大于水动力。

图 12 是处于分层界面工况潜水器运动轨迹。由图中可以看出，处于分层界面的模型在内孤立波作用下作顺时针运动，且内孤立波在通过模型过程中，模型始终在分层界面上，会产生明显的垂荡运动，运动幅值与内孤立波波幅基本一致；纵荡运动幅值也较大，在内孤立波完全通过后，模型会产生超过 1 倍艇长的纵荡距离。

3 潜水器纵向运动影响因素分析

潜水器在内孤立波作用下会产生大幅度的掉深和俯仰运动，严重威胁潜水器的航行安全，因此不仅要揭示内孤立波中潜水器的运动机理，还需要探究影响潜水器运动的相关因素，为后续评估潜水器深海环境适应性提供支撑，主要分析的影响因素包括潜深、分层厚度比和内孤立波波幅等。

3.1 潜深的影响

对 4 种典型工况展开计算分析，即潜水器位于低密度层 ($d=0.15\text{ m}$)、分层界面 ($d=-0.031\text{ m}$)、高密度层但在波幅范围内 ($d=-0.55\text{ m}$)、内孤立波波幅以下 ($d=-0.95\text{ m}$)。

图 13 是不同潜深的潜水器运动响应曲线对比。由垂荡运动对比可知，不同潜深的潜水器垂荡运动过程基本一致，但垂荡幅值不同， $d=0.15\text{ m}$ 工况垂荡幅值为 -0.485 m ， $d=-0.031\text{ m}$ 工况垂荡幅值

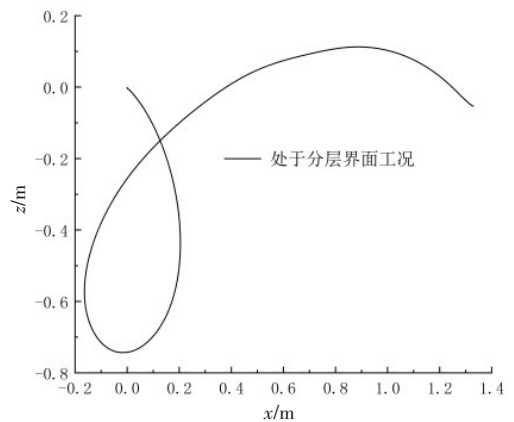


图 12 处于分层界面工况潜水器运动轨迹

Fig.12 Motion track of submersibles on stratified interface condition

为 -0.743 m , $d=-0.55\text{ m}$ 工况垂荡幅值为 -0.543 m , $d=-0.95\text{ m}$ 工况垂荡幅值为 -0.435 m 。综上可知:处于分层界面的潜水器垂荡幅值最大,与内孤立波波幅相当;而其它三种工况时潜水器垂荡幅值均小于波幅。这说明潜水器在内孤立波中垂荡运动幅值主要由内孤立波波幅决定,且潜水器航行深度离分层界面越远,则掉深越小。

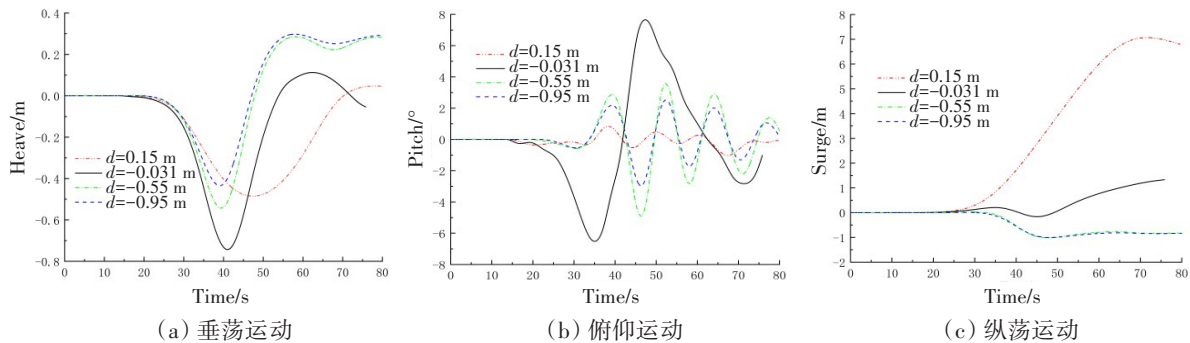


图 13 不同潜深的潜水器运动响应对比

Fig.13 Comparison of motion responses of submersibles at different depths

由俯仰运动对比可知,不同潜深的潜水器在内孤立波作用下,始终在艏倾和艉倾之间变换,处于分层界面潜水器的俯仰运动幅值最大,达到 7.08° ,其它工况下潜水器的俯仰运动幅值相对较小,但 4 种工况下俯仰运动幅值均小于内孤立波最大波倾角,这也说明潜水器俯仰运动幅值主要由内孤立波最大波倾角决定,且潜水器离分层界面越远,其俯仰运动就越小。

图 14 是不同潜深的潜水器运动轨迹对比。由图中可以看出,除了位于低密度层的潜水器遭遇内孤立波时运动是逆时针旋转,其它工况下的运动轨迹相似,均是顺时针旋转,这与潜水器所处内孤立波流场有关。

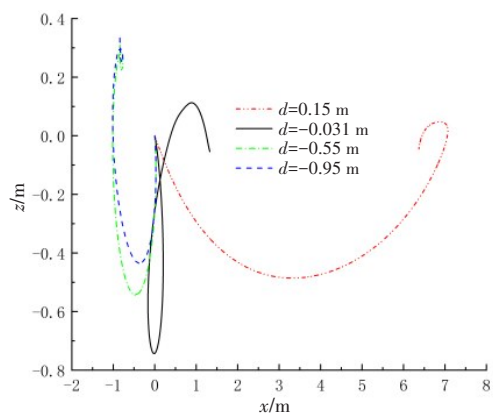


图 14 不同潜深的潜水器运动轨迹对比

Fig.14 Comparison of motion tracks of submersibles at different depths

3.2 波幅的影响

对位于分层界面的潜水器遭遇 3 种不同波幅内孤立波时的运动响应展开计算分析,即波幅 $a=0.895\text{ m}$ 、 0.75 m 和 0.574 m 。

由图 15 可以看出,不同内孤立波波幅下潜水器的运动趋势基本一致,不过幅值差异较大,说明内孤立波波幅对潜水器在内孤立波中的运动响应影响较大,波幅越大,则潜水器的运动响应越剧烈,这与客观物理事实相一致。

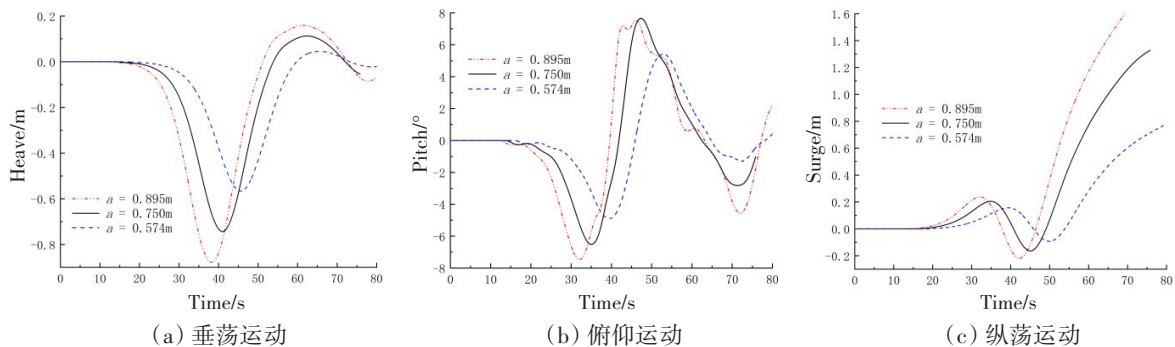


图 15 不同波幅下潜水器运动响应对比

Fig.15 Comparison of motion responses of submersibles at different wave amplitudes

3.3 分层厚度比的影响

海洋中密度分层结构受温度和盐度影响,不同季节的海洋密度分层结构不尽相同,春季密度分层深度最浅而冬季最深。密度分层深度不同,则内孤立波波幅也会随之变化。数值水池的参数如下:总水深 $H=5.8\text{ m}$,低密度水层密度 $\rho_1=1000\text{ kg/m}^3$,高密度水层密度 $\rho_2=1020\text{ kg/m}^3$,波幅 $a=0.75\text{ m}$;计算中潜水器位于分层界面处,上下层厚度比 $h_1/h_2=0.35、0.25$ 和 0.16 。

由图 16 的垂荡运动对比可以看出,不同海洋分层厚度比下,潜水器的垂荡运动幅值基本相同,但穿越时间随分层厚度比增大而增大。由俯仰运动对比可以看出,俯仰运动幅值随分层厚度比的增大而减小,这是由于内孤立波最大波倾角会随分层厚度比的增大而减小,致使潜水器俯仰运动幅值也随之变化。对比纵荡运动可以看出,随着分层厚度比的增大,潜水器向左运动的距离逐渐变大,而向右运动的距离逐渐变小。这是因为低密度层水平速度随分层厚度比的增大而减小,高密度层水平速度随分层厚度比增大而增大。综上可知,在内孤立波波幅一定时,随着海洋分层厚度比的增大,潜水器的垂荡运动幅值基本相同,而纵荡运动和俯仰运动幅值逐渐减小,潜水器运动剧烈程度逐渐缓和。

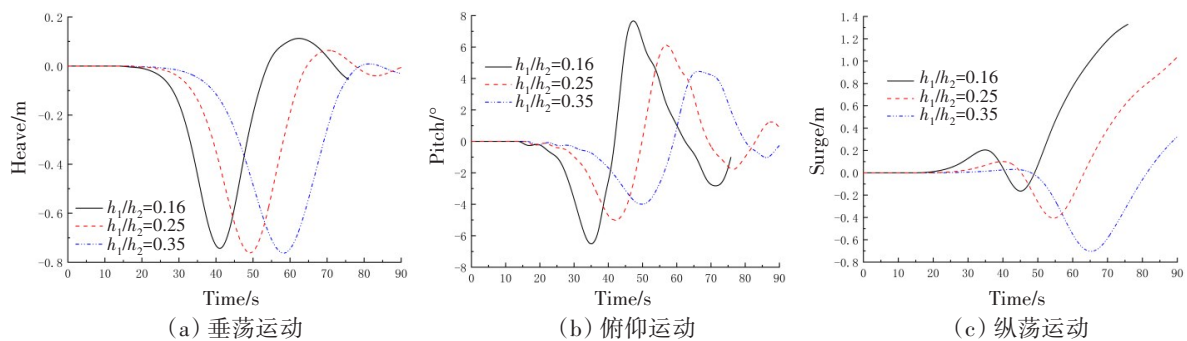


图 16 不同分层厚度比下潜水器运动响应对比

Fig.16 Comparison of motion responses of submersibles at different stratified thickness ratios

4 结 论

本文基于 CFD 方法,模拟分析了无动力悬浮潜水器在内孤立波作用下的运动过程,在此基础上分析分层厚度比、波幅、潜深等因素对内孤立波中无动力悬浮潜水器纵向运动响应的影响,依据上述研究可以归纳出以下结论:

(1) 对比不同潜深的潜水器在内孤立波作用下的运动响应可以看出,潜水器遭遇内孤立波时,垂荡和俯仰运动对潜水器航行安全威胁最大。处于低密度层时潜水器最安全,垂荡和俯仰运动幅值均较小;处于分层界面和处于内孤立波波幅以下均较危险,前者俯仰运动幅值太大,不利于潜水器操纵控制,可能引起误操,而后者绝对掉深深度较大,可能超过极限深度。

(2) 潜水器在遭遇内孤立波时,均会产生一定程度的垂荡和俯仰运动,且垂荡和俯仰运动幅值由内孤立波波幅和最大波倾角决定。

(3) 通过对比不同潜深的潜水器遭遇内孤立波的运动轨迹,发现处于低密度水层的潜水器作逆时针运动,而处于分层界面或高密度水层的潜水器的运动轨迹为顺时针方向。

(4) 通过对内孤立波作用下潜水器运动响应影响因素分析发现,潜深、内孤立波波幅、分层厚度比等因素对潜水器运动均有较大影响。

参 考 文 献:

- action with a submerged slender body[J]. *Science China (Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2014, 57(2): 301–310.
- [2] Du Hui, Wei Gang, et al. Experimental investigation of the load exerted by nonstationary internal solitary waves on a submerged slender body over a slope[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 216–223.
- [3] 武军林, 魏 岗, 杜 辉. 下凹内孤立波流场与横置细长潜体相互作用特性的实验研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2017, 5: 592–599.
Wu Junlin, Wei Gang, Du Hui. Experimental study on the flow variation of internal solitary wave and its interaction with a traverse submerged slender body[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 5: 592–599. (in Chinese)
- [4] 关 晖, 魏 岗, 杜 辉. 内孤立波与潜艇相互作用的水动力学特性[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 13(5): 577–582.
Guan Hui, Wei Gang, Du Hui. Hydrodynamic properties of interactions of three-dimensional internal solitary waves with submarine[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 13(5): 577–582. (in Chinese)
- [5] 黄苗苗, 张 楠, 朱爱军. 内波作用下水下航行体水动力载荷及运动特性研究[J]. *船舶力学*, 2019, 23(5): 531–540.
Huang Miaomiao, Zhang Nan, Zhu Aijun. Hydrodynamic loads and motion features of a submarine with interaction of internal solitary waves[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(5): 531–540. (in Chinese)
- [6] 陈 杰. 内孤立波造波及其与潜艇作用的数值模拟[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2010.
Chen Jie. The numerical simulation of internal solitary waves generating and the interaction of internal solitary waves with the submarine[D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2010.
- [7] 杨 帆. 海洋内孤立波与水下潜器相互作用研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
Yang Fan. Study on the interaction between internal solitary waves and the submerged body[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [8] 刘 乐, 姚志崇, 冯康佳. 内孤立波作用下潜水器运动响应数值分析[J]. *舰船科学技术*, 2022, 4: 47–53.
Liu Le, Yao Zhichong, Feng Kangjia. Numerical analysis of motion response of submersible under internal solitary waves[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 4: 47–53.
- [9] 李效民, 张 林, 郭海燕, 等. 内孤立波数值造波方法及其与理论和实验结果比较[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 5: 898–905.
Li Xiaomin, Zhang Lin, Guo Haiyan, et al. Comparison of numerical wave-generating methods for internal solitary waves with theoretical and experimental results[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2016, 5: 898–905.
- [10] 方欣华, 杜 涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004: 308–310.
Fang Xinhua, Du Tao. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Seas[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2004: 308–310.