

水下运动目标的水面波纹数值模拟及分析

李丹梦, 金伟其, 李力, 鲁啸天, 裘溯

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 水下运动目标与水体的相互作用会在水面产生开尔文尾迹和伯努利水丘等特定波纹, 为机载、星载的雷达光电探测水下运动目标的位置及速度等提供了可能, 成为当前国内外研究的重要方向之一。为了研究水下运动目标水面波纹的特点, 论文采用三维不可压缩 RANS 方程, 辅以 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 VOF 自由面处理方法建立了水下运动目标水面波纹模拟的数学模型, 并对水下航行体在不同速度及深度等参数情况下的水面波纹进行模拟, 分析了速度及深度等参数与尾迹特征的关系。论文结果对实尺度水下潜艇的海面波纹模拟以及水下潜艇探测技术的研究具有意义。

关键词: 水下运动目标; 水面波纹; Kelvin 尾迹; 伯努利水丘; 数值模拟

中图分类号: U661.3; TP321; O352 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1126004

Numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target

Li Danmeng, Jin Weiqi, Li Li, Lu Xiaotian, Qiu Su

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The interaction of moving submerged target and fluid will generate specific wave patterns, such as the Kelvin wave and the Bernoulli dome, which provides possibility for the airborne and spaceborne radar to get the parameters including location and velocity of the target using photoelectric detection. It has become an important research direction. In order to study the characteristics of the wave pattern, a mathematic model was established by using the 3-D incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the volume-of-fluid (VOF) method. The simulation result of the wave patterns of the submerged target at different depths and velocities reveals the relationship between the parameters and the wave pattern. The result obtained is significant for the simulation and detection technology of real submarines.

Key words: moving submerged target; wave pattern; Kelvin wave; Bernoulli dome; numerical simulation

收稿日期: 2018-06-01; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61575023); 总装武器装备预研基金(9140A02060415BQ01005)

作者简介: 李丹梦(1992-), 女, 硕士生, 主要从事光电成像技术方面的研究。Email: lidmtx@163.com

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器的研究。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引言

我国海域辽阔海岸线漫长,海洋安全对我国来说至关重要。在南海周边海上安全形势逐渐严峻的大背景下,潜艇以其在海洋中的强机动性和高隐蔽性的特点发挥了其他舰船难以替代的作用。其中,战略核潜艇更以较强的续航机动能力,成为各国重点发展的海上核心作战力量。

及时准确地发现敌方潜艇踪迹,并获取其位置、潜深、航行姿态及航速等特征信息,是建立海洋反潜的关键问题。由于潜艇消声消磁技术的发展,光学探测反潜技术成为探测水下目标的热门手段^[1],如利用红外热成像探测潜艇尾流^[2]、利用尾迹气泡进行光学探测^[3]、利用激光雷达探测潜艇船体、利用水动力学尾迹进行位置识别等。

目前美国已开展研究声学及液体隐身技术来使潜艇躲避声纳和雷达的探测。与此同时,美国大众科技网站在 2012 年 1 月报道利用水面“伯努利水丘”和“开尔文尾迹”等尾迹现象(如图 1)可探测水下 1 000 ft(1 ft=0.3048 m)的水下航行目标,且探测手段受水质的影响小,基于水动力学的尾迹探测是非常具有前景的探测方法。

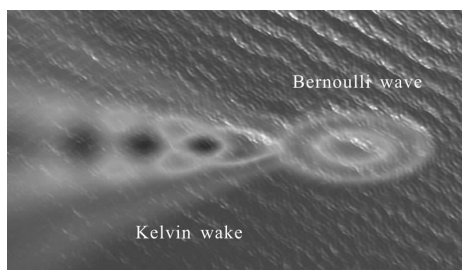


图 1 水下运动目标的伯努利水丘和开尔文尾迹

Fig.1 Bernoulli dome and Kelvin wave of a moving submerged target

相比于其他探测技术需要的物理场信息,水下运动目标在水面产生的特征波纹(开尔文尾迹、伯努利水丘等)极难被“隐身”,因此,利用其来探测潜艇信息的技术应运而生。水下运动目标的水面波纹是实现目标探测的重要信息,因此充分掌握水下运动目标在海面产生的尾迹特征是探测基础。由于数值模拟方法研究周期较短,费用低于真实环境模拟,已成为诸多领域的现代分析技术手段。近年来国内外

在潜艇尾迹的热特性与散射特性研究等方面已取得进展^[1-4],但结合水丘及尾迹的波纹模拟与探测应用方面的研究仍相对较少。为了全面了解水下运动目标的水面波纹特性,文中基于 RANS 方程,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型以及 VOF 自由面的处理方法建立数学模型,对不同速度、不同深度以及带/不带指挥塔的水下目标在均匀流体中运动产生的水面尾迹进行数值模拟,并对比分析模拟结果,归纳不同运动参数下,水下运动目标在水面产生的伯努利水丘及开尔文尾迹等水面波纹的分布特征。

1 水下运动目标的水面波纹模型

1.1 RANS 方程

在三维坐标系下,将流场动量方程、连续性方程及粘性应力方程组合,得到针对不可压缩流场的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes,N-S)方程。然而一般条件下计算机的性能往往难以支撑 N-S 方程的直接求解,因此在实际工程中通常对高雷诺数流动进行简化处理,使 N-S 方程便于解算。其中,时间平均法是常用的处理方式,它将湍流运动分为瞬时脉动和时间平均两类流动形式,将脉动值和时均值分离计算。

按照雷诺平均法,对时间取平均,得到时均处理的湍流流动控制方程和连续性方程^[4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \bar{F}_i = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{array} \right. \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, x_3 分别为 x, y, z 轴的数值; \bar{u}_i, u_i' 分别表示速度在 i 方向的时均值和脉动值; ρ 表示流体密度; \bar{F}_i 表示微元所受质量力; μ 表示流体的动力粘性系数; \bar{p} 表示微元所受总压强; $-\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力项。该方程也称为时均 N-S 方程(Reynolds-Averaged N-S, RANS 方程)。

1.2 湍流模型

由于 RANS 方程中雷诺应力项 $-\overline{u_i' u_j'}$ 的出现使得方程组不封闭,通常的处理方法是引入新的湍流模型作为补充,使得控制方程封闭。在流体力学中提供了多种湍流模型选择,包括代数应力方程模型(ASM)、雷诺应力方程模型(RSM),以及基于湍流粘

性系数法的零方程模型、一方程模型(S-A)、二方程模型。

湍流二方程模型是最简单的完整模型之一,其中最常用的为 $k-\varepsilon$ 模型^[5]。但由于标准 $k-\varepsilon$ 模型的各向同性假设,使其在模拟复杂湍流流动尤其是高雷诺数流动时存在一定的局限性。因此在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上,提出了重整化 $k-\varepsilon$ 模型(RNG $k-\varepsilon$ 模型),它引入了附加项,并提供适用于高雷诺数湍流区的解析函数,可有效提高计算精度和湍流模拟效果。

采用 RNG $k-\varepsilon$ 二方程模型, k, ε 定义为:

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_j'} \\ \varepsilon = \mu_t \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \end{cases} \quad (2)$$

湍流动能 k 的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

湍流耗散率 ε 的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中:当重力方向和主流方向垂直时, $C_{1\varepsilon}=1.42, C_{2\varepsilon}=1.68, C_{3\varepsilon}=0; \alpha_k, \alpha_\varepsilon$ 分别是 k, ε 的有效湍流普朗特数的倒数; G_k, G_b 为湍流动能生成项; Y_M 代表可压缩流中脉动扩张的贡献; S_k, S_ε 为源项; $\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu$ 。求解以上封闭方程组可对流场压力和速度分量进行求解。

1.3 VOF 方法

对水面尾迹的仿真模拟涉及到多相流自由面的处理问题,需要对数值离散后的自由面进行追踪。文中采用 VOF 模型进行界面追踪,VOF 自由面处理是一种在固定欧拉网格下的表面追踪方法^[6],适用于流体场中具有两种或多种不相融流体交界面,其以流体占据网格单元体积分数为依据,对自由面演化进行追踪处理。

对第 q 相流体有:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

各相流体的体积分数之和满足:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (6)$$

式中: u_i 代表微元速度; α_q 代表第 q 相流体所占体积分数。要得到水面的尾迹分布,文中采用 $\alpha_{\text{water}}=0.5$ 的交界面来代表自由面。

1.4 边界条件的设置

数值求解需要设置合理的边界条件。由于文中的模拟利用 VOF 模型,因此对边界条件提出以下三点限制^[7]:

- (1) VOF 模型只能采用基于压力的解算器;
- (2) 周期性流动问题不能与 VOF 模型同时计算;
- (3) VOF 只允许一相被定义为可压缩理想气体。

由于 VOF 模型的计算依赖于时间项,故适用于求解瞬态问题。考虑到对边界条件的约束,对水下运动目标水面波纹的模拟采用如图 2 的设计:在计算域中目标和流体流动具有对称性,因此,采取一半的计算区域,即为 $L(W/2) \times H$ 的矩形区域。椭球体的对称中剖面与矩形中剖面重合,其中流场区域为二相流,自由液面(海面)上部为空气,下部为水;椭球体(水下目标)在一定潜深 h ,沿单一(图中向右)方向在流场区域里做匀速直航运动,在航行中潜体与交界面的间距保持恒定;根据相对运动原则,直航椭球体对水面的波纹模拟能够与均匀流体的绕流模型进行等价。因此,实际计算中假定椭球体静止不动,流体沿椭球体长轴方向匀速流动,当来流遇到椭球体后,产生的内波扰动使自由液面发生形变,产生水面特征波形。

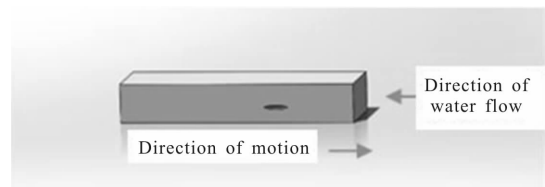


图 2 潜体计算域

Fig.2 Computational domain of the submerged target

在这种情况下,将边界条件定义为:

(1) 压力入口条件同时适用于可压/不可压流,且支持明渠流动效果的流场初始化,故文中采用压力入口(pressure-inlet)边界条件。潜体行进方向为空气和水的入口,利用 patch 定义水的区域及自由面高度。

(2) 潜体行进后方为空气和水的出口,为了保持计算域内压力的恒定,且与入口边界条件相呼应,在此采用压力出口(pressure-outlet)边界条件,湍流特征参数与入口边界条件相同。

(3) 潜体中剖面为对称(symmetry)边界条件,对称面边界条件指没有穿过该界面的流动,流动变量沿边界的法向导数为 0。计算域侧面、上下底面,考虑其对尾迹的影响降至最低,也采取对称边界条件。

(4) 回转椭球体的表面为固壁边界条件,壁面无滑移。

2 模拟结果及分析

2.1 模型的选取

实际潜艇线型复杂、局部结构繁多,为了简化潜艇建模过程,通常选择几何体来模拟。其中又以回转椭球体最接近于潜艇的形状,故在三维流场数值模拟中被广泛应用。典型核潜艇的长短轴之比接近 10:1,考虑到计算量,对回转椭球体的椭圆对称面长轴和短轴分别取 60 m 和 6 m。

设置计算域时,要求边界对椭球体近场区域的影响尽可能小,计算区域需要适当取得大些;同时为了减小计算量,计算域又不宜过大,在实际工程中,

建立计算域往往是半经验的过程。经过多次尝试,在不失一般性的条件下,确定的计算区域为:椭球体前方保留 100 m,后方 540 m,侧方 200 m,水下 27 m,水上 3 m,目标深度取 15 m,即为 $L \times (W/2) \times H = 700 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的长方体。其中深度定义为潜艇模型重心到水面的垂直距离。

总的来说,文中是利用三维不可压缩 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 VOF 自由表面处理方法建立数学模型。其中,RANS 方程的离散采用基于单元中心的有限体积法;湍流方程的扩散项采用二阶精度的中心差分格式、对流项采用二阶迎风模式来离散;压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法;近壁面区域通过标准壁面函数法(Standard Wall Functions)处理。

2.2 相同深度不同速度下的模拟分析

首先对水下目标在 15 m 深度、14 种不同速度运动的情况进行模拟仿真,分析比较水面波纹的特征。图 3 给出速度 9~25 m/s 的 12 种水面波纹,表 1 给出了对应不同速度的波峰和波谷高度值。可以看出:

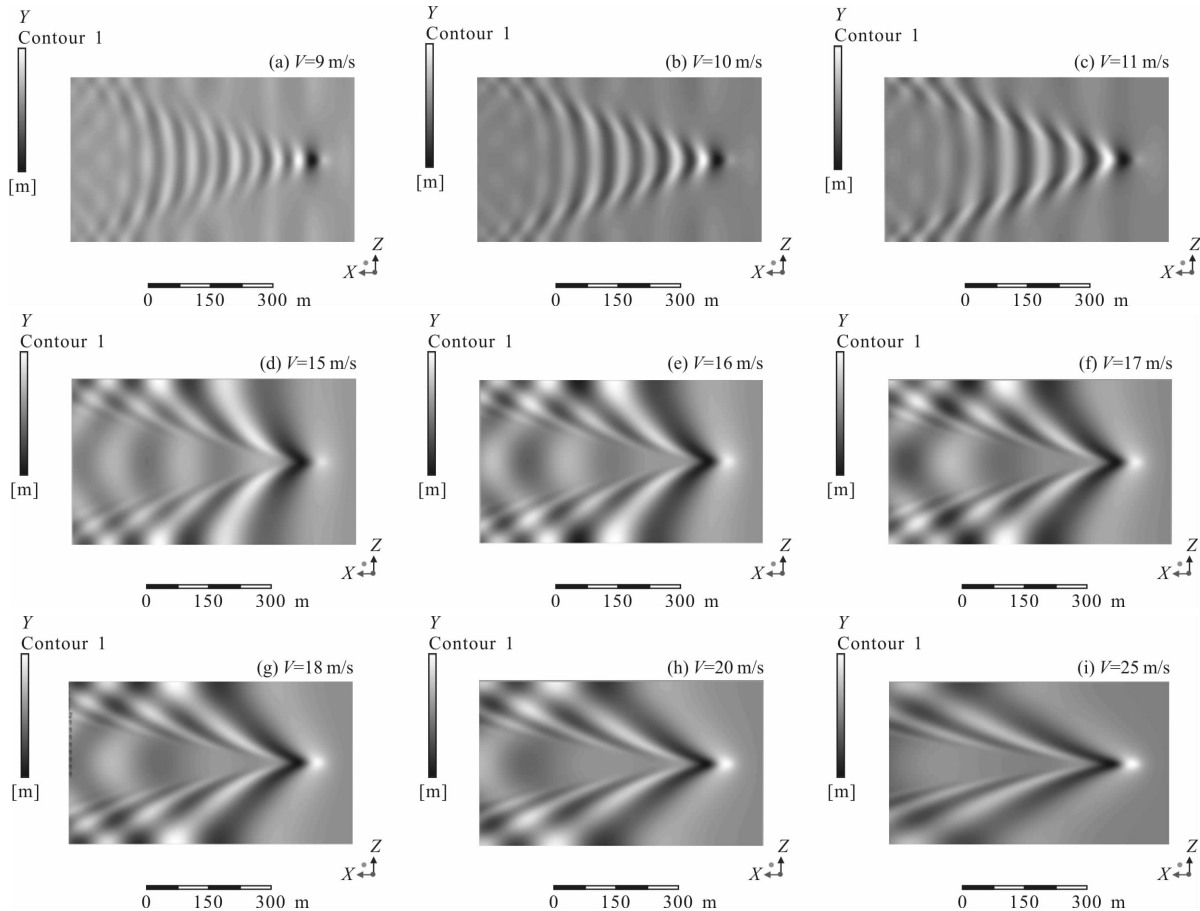


图 3 相同深度下不同速度对应的水面波纹

Fig.3 Wave pattern at the same depth but different velocities

表 1 不同速度下波峰、波谷及波长数值

Tab.1 Wave's height & length at different velocities

Velocity/ m·s ⁻¹	Trough/mm	Peak/mm	Theoretical wavelength/m	Actual wavelength/m
6	-66.280	44.312	23.06	-
9	-335.749	221.646	51.89	-
10	-449.517	441.922	64.05	60.0
11	-588.676	582.006	77.50	70.6
12	-756.909	693.097	92.23	92.3
13	-990.400	837.184	108.24	109.0
14	-956.604	724.195	125.54	120.0
15	-889.747	656.905	144.11	133.0
16	-691.719	564.892	163.97	150.0
17	-601.877	548.309	185.10	171.0
18	-570.879	498.064	207.52	200.0
20	-519.800	468.042	256.20	-
25	-440.951	464.770	400.31	-
30	-383.730	472.565	576.45	-

(1) 在水面水下运动目标的前端和后方分别形成了明显的伯努利水丘和开尔文尾迹。随着速度增加,伯努利水丘部分形成波纹最高峰,其后紧随着产生一个最低波谷,形成最大的波幅差,是水下运动目标探测的重要信息点。

(2) 虽然开尔文尾迹的形状随水下运动目标的速度有所变化。当速度变大时,尾迹夹角呈现变小的趋势,但总体上两臂之间夹角保持在 19°28' 左右(利用与参考文献[8]相同的水下运动小球也得到相同的计算结果),表明文中模型的模拟结果与有关理论和参考文献的结论一致,初步验证了模型的正确性。

(3) 由波浪理论分析^[9]可知,开尔文尾迹波长只与潜体运动速度 v 有关,速度越大波长越长,不同速度对应的理论波长为:

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \cdot v^2 \quad (7)$$

表 1 给出了模拟尾迹波长随着速度的变化,数值与理论波长基本一致,表明模拟的正确性。由此也可推论:通过对水面波纹波长估计,可对水下运动目标速度进行大致的估计。

(4) 基于水深 h 的 Froude 数计算公式^[10]:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (8)$$

当 F_r 数较小 ($F_r < 1$) 时,自由面波纹特征呈横波

特征;随着 F_r 数逐渐变大 ($F_r > 1$),尾迹中散波系的成分逐步增加并占据主导^[11],这与图 3 模拟结果一致。由实际波纹类型的判断结合对波长的估计,可望对水下运动目标的深度进行大致分析。

(5) 将不同速度下的波峰、波谷及波幅数据绘制成图 4,可以看出:水下目标水面波纹的波峰、波谷以及波幅(=波峰-波谷)并不是随着运动速度的增大而单调增大,基本表现为单峰状态:低速时随着潜艇速度的增大,波峰/波谷/波幅快速增加,当达到某一速度时(转捩速度),幅度达到最大;之后随着速度的增大,波峰/波谷/波幅逐渐趋稳。按照相关研究^[12],船舶和 underwater 物体运动过程确实存在一个转捩速度(文中波幅的转捩速度约为 13 m/s),其波峰/波谷/波幅随着速度的变化规律与文中模拟结果基本一致。

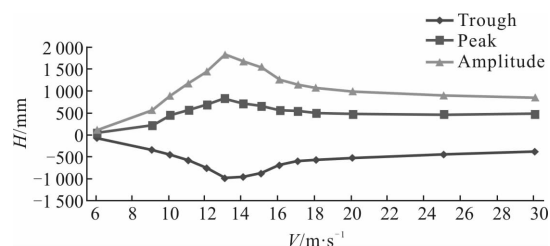


图 4 不同速度下的波峰、波谷、波幅高度图

Fig.4 Wave's height at different velocities

综合分析表明:文中模型和边界条件设置的正确性和合理性。

2.3 带/不带指挥塔的模拟对比分析

一般的现代潜艇都存在指挥塔结构,理论上指挥塔的存在对水面尾迹会有一些影响。这里将在 2.2 节中不带指挥塔的模拟基础上,进行带指挥塔的模拟对比实验,带指挥塔的目标模型是在原模型上增加一个附体(椭圆柱体,如图 5(a)),其中指挥塔最高点到潜艇轴线的距离 6 m,底面椭圆长轴 6 m,短轴 2 m。采用与 2.2 节相同的计算域和速度参数进行模拟。

图 5(b)给出 20 m/s 的模拟结果对比,表 2 给出两种典型速度 14 m/s 及 20 m/s 下有/无指挥塔时水面波纹的波峰、波谷及波幅数值。结果表明:虽然有/无指挥塔对尾迹形状没有明显的影响,但有指挥塔时伯努利水丘的波峰和波谷都更明显;转捩速度的改变相对较小,基本保持在 13~14 m/s 附近;尾迹波谷都出现在伯努利水丘的第一个凹陷处,当速度较

小时,尾迹最大波幅出现在水丘第二个隆起与尾迹第二个波峰的叠加处,随速度增加水丘的第一个隆起高度将占据主要地位。

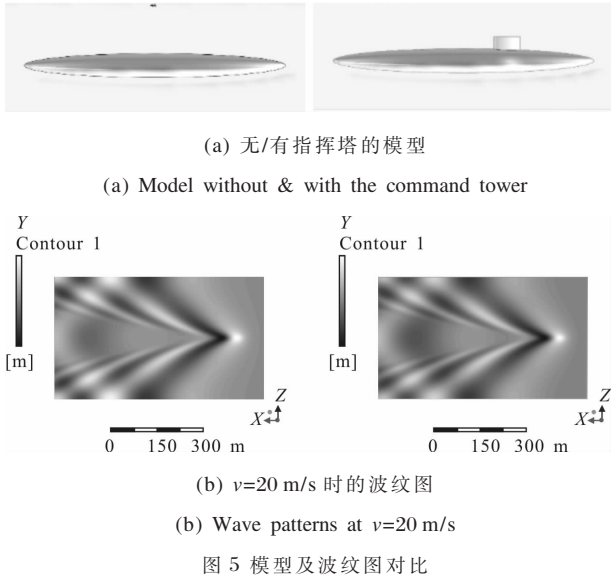


图 5 模型及波纹图对比

Fig.5 Model and wave patterns with/without attachment

表 2 无/有指挥塔时的波峰、波谷及波幅的高度
Tab.2 Wave's height without & with the command tower

Velocity/ $m \cdot s^{-1}$	Command tower	Peak/mm	Trough/mm	Amplitude/mm
14	N	724.20	-956.60	1680.80
14	Y	737.40	-1072.29	1809.69
20	N	468.04	-519.80	987.84
20	Y	557.77	-536.00	1093.78

2.4 讨论

水下运动目标的水面波纹分析有很多方面,鉴于篇幅限制,这里简单补充模拟的几点结果:

(a) 水下更深目标的水面波纹模拟

为了了解更深水下运动目标的水面波纹特点,模拟了水深 50 m 和 70 m 水下运动目标(不带指挥塔)的水面波纹如图 6 所示,对应的波峰和波谷数值如表 3 所示。可以看出:(1) 水面波纹从横波状过渡到纵向杂散波的临界速度,50 m 水深下大约在 22 m/s,70 m 水深下大约在 26 m/s,与理论公式(8)仍保持相当;(2) 波峰和波谷的位置随速度增加逐渐后移,且移动幅度随水深增加逐渐减小;(3) 在 50 m 和 70 m 水深下,水面波纹的最大波幅约有 219~245 mm 和 171 mm,结合波纹的特殊形状,仍具有明显的探测和识别特征。

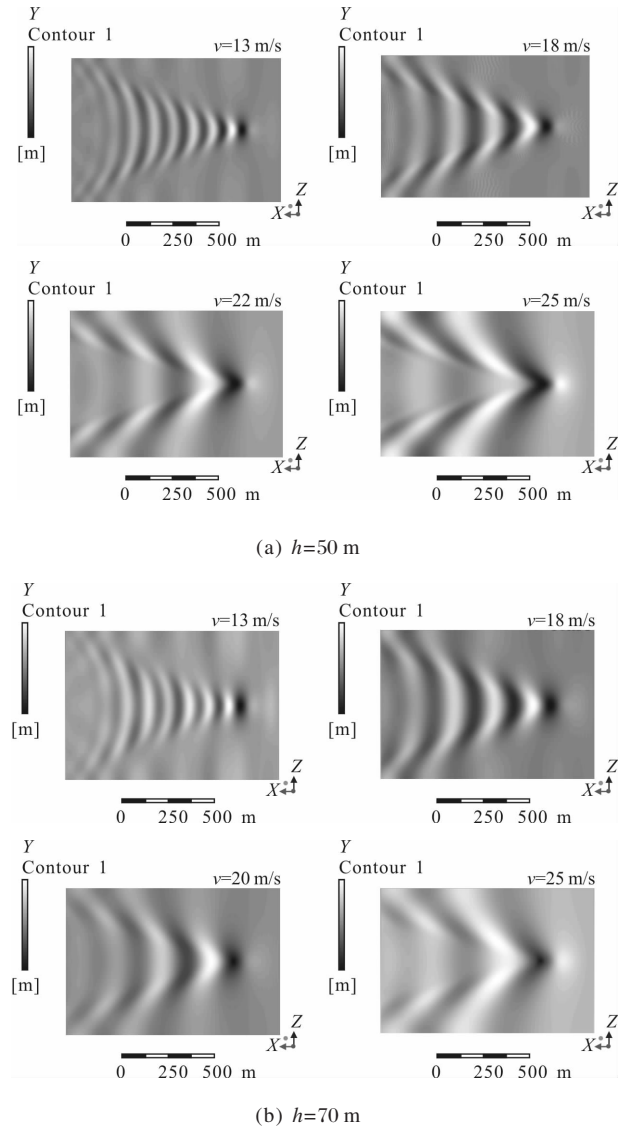


图 6 不同深度下 4 种目标速度的水面波纹

Fig.6 Wave patterns at four specified velocities in different depths

表 3 水深 50 m/70 m 时水面波纹的波峰、波谷高度
Tab.3 Wave's height at $h=50/70$ m

Depth/m	Velocity/ $m \cdot s^{-1}$	Peak/mm	Trough/mm
50	13	53.95	-59.57
50	15	83.70	-85.12
50	18	105.77	-113.97
50	22	97.58	-147.84
50	25	69.33	-120.57
70	13	16.14	-25.58
70	15	32.82	-34.14
70	18	56.98	-58.69
70	20	77.67	-94.18
70	25	49.35	-97.08

(b) 同一速度不同深度下的模拟分析

为了减少计算量且直观地看到深度对波纹的影响,采取小型回转椭球体(长轴 4 m,短轴 1 m)目标进行了深度分别为 2、5、10、15 m 的模拟。计算区域为椭球体前方取 25 m,后方取 175 m,侧方取 80 m,自由面上方取 0.5 m,下方长度视深度而定(例如深度为 5 m 时,高度取 10 m;深度为 10 m 时,高度取 15 m)。在速度 9 m/s 条件下的数值模拟结果如图 7 所示。

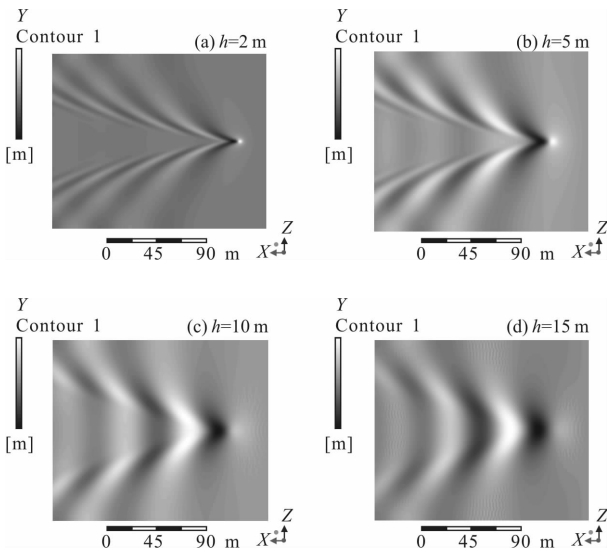


图 7 9 m/s 速度下小目标在 4 种深度的水面波纹

Fig.7 Wave pattern of small target at four different depths at $v=9\text{ m/s}$

随着深度的增加,波峰和尾迹高度会明显减小,当深度增加到 15 m 时,可降到深度 2 m 时的 4%~6%,但图像中水面尾迹的形状还是较为清晰。随着深度的增加,尾迹部分的横波成分越来越多。 F_r 数是评价水面波纹形状特征的重要参数, F_r 数越小,横波在波纹特征中所占的比例就越大。上面 4 个深度的 F_r 数分别为 2.03、1.28、0.90、0.74,与 2.2 节关于 F_r 数与波纹特征的关系描述一致,可以推测当深度大于 20 m 后,波纹基本以横波为主,散波将逐渐减少至消失。

(c) 边界设置与精度

边界条件的设置会影响模拟计算的精度。实际海面的流场域无限远,而文中将底面和侧面均设置为对称边界条件,这与真实情况有所区别。只有水下目标的计算域边界足够远,才能忽略其对尾迹的影响。在 2.2 节的模拟中(如图 3 所示),波纹后端侧边

存在的轻微反射波纹就是有限对称边界的影响。在底面也会存在轻微的反射现象,只是随着模拟水深的加大,底面反射对水面特征波纹的影响将会减小,与此同时整个矩形计算区域扩大,需要更多数量的网格才能达到适合的计算精度。受目前计算机处理能力的限制,此文没有进行更大区域的扩展。

(d) 风生重力波及对水下运动目标探测的影响

在无其他干扰条件下,海面风生重力波将是水下运动目标水面特征波纹的主要干扰因素。由于水面波动符合波动叠加原理,因此海面混合波纹是风生重力波和水下运动目标水面特征波纹的叠加。目前海面波已有多种较为成熟的海浪谱模型^[13],可依据气象条件,确定其统计特性,模拟风生重力波的分布,与文中水面特征波纹组合,可模拟得到给定天候条件下较为真实的混合波面分布,为后续基于水面波纹的目标探测算法研究及验证提供各种模拟图像源。初步的模拟和分析表明,虽然水面特征波纹的波幅可能与风生重力波的波高相当甚至更小,但利用水面波纹的分布特征,可望通过特征提取或滤波等图像处理手段,从混合波纹中突出特征波纹,提高对水下运动目标的探测能力。

3 结 论

文中通过数值模拟,初步确定了较佳的参数匹配,总结归纳了水下运动目标水面波纹模拟的流体力学方程及边界条件,建立了基于 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 VOF 自由面处理方法的数学模型。对不同速度、深度、有无指挥塔的水下运动目标水面波纹进行模拟,分析比较不同参数下水面波纹的波形特征。模拟结果表明:(1) 随着水下运动目标运动速度的增加,水面特征波纹的波幅呈现先增大后减少并趋于稳定的趋势;水下运动目标越大,深度越浅,水面特征波纹越明显;(2) 开尔文尾迹的波长可作为水下运动目标运动速度估计的依据;(3) F_r 数对水面波纹形状起着决定性作用,当 $F_r < 1$ 时,尾迹波形以横波为主,当 $F_r > 1$ 时,逐渐由散波占据主导地位;结合尾迹波长,可以对水下运动目标的速度进行大致的二相分类;(4) 当增加指挥塔后,明显增加了伯努利水丘的波峰高度,可进一步提高对潜体位置等参数的探测概率。

利用水下运动目标的水面波纹特征进行探测和

识别是一种具有应用前景的方法,探索有效的光电成像检测是需要重点研究的方向。进一步考虑目标细部结构、优化细分网格和计算参数配置,并强化计算平台提高处理速度,对于提高水下运动目标水面波纹的探测能力具有重要意义。此外,通过改变水下目标与水体融合性能还可进一步研究潜艇的隐身技术(例如,美国采用纳米技术优化潜艇表面材料,达到减小水面波纹,进而降低潜艇探测概率的效果)。

参考文献:

- [1] Zhu Hairong, Zhu Hai, Liu Jintao, et al. Measurement system for optical concealment depth of underwater vehicle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (10): 2778–2784. (in Chinese)
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.
- [2] Zhang Shicheng, Yang Li, Shi Heng. Infrared characterization and detection of ship wake based on ray tracing method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1450–1455. (in Chinese)
张士成, 杨立, 石恒. 基于射线跟踪算法的舰船尾迹波红外特征与探测[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1450–1455.
- [3] Qin Gang, Yang Yu, Zhang Jiansheng. Monte Carlo simulation of polarization properties of scattered light from far ship wakes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1730–1736. (in Chinese)
秦刚, 杨郁, 张建生. 舰船远程尾流散射光偏振特性的蒙特卡洛模拟[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1730–1736.
- [4] Zhang Nan, Zhang Shengli, Shen Hongcui, et al. Numerical simulation of hull/propeller interaction with free surface [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27 (1): 94–99. (in Chinese)
张楠, 张胜利, 沈泓萃, 等. 带自由液面的艇/桨干扰特性数值模拟与验证研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27 (1): 94–99.
- [5] Yang G. RNG $k-\varepsilon$ pump turbine working condition of numerical simulation and optimization of the model [C]// International Conference Intelligent Computing, 2016.
- [6] Chang Y, Zhao F, Zhang J, et al. Numerical simulation of internal waves excited by a submarine moving in the two-layer stratified fluid [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser B*, 2006, 18(3): 330–336.
- [7] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225.
- [8] Luo Huan. The surface wake generated by a submerged moving body in a stratified viscous fluid and its interaction with the stochastic ocean waves [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
罗桓. 粘性分层流中水下航行体尾迹在随机海面中的表现特征研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [9] Hong Fangwen, Chang Yu. Numerical simulation of surface wake for submarine moving in homogenous fluid [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2005, 9(4): 9–17. (in Chinese)
洪方文, 常煜. 均匀流中潜艇水下运动表面尾迹的数值模拟[J]. 船舶力学, 2005, 9(4): 9–17.
- [10] Lustrì C J, Chapman S J. Unsteady flow over a submerged source with low Froude number [J]. *European Journal of Applied Mathematics*, 2014, 25(5): 655–680.
- [11] Sheng Li, Wang Chong, Liu Jubin. Numerical simulation of internal waves caused by moving submerged body in two-layer fluid [J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(17): 60–64. (in Chinese)
盛立, 王冲, 刘巨斌. 两层介质中运动潜体内波的数值计算[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(17): 60–64.
- [12] Wang Hongwei, Chen Ke, You Yunxiang, et al. Experiments on internal waves generated by a towed revolution body with different depths in a stratified fluid [J]. *Chin Sci Bull*, 2017, 62(19): 2132–2148. (in Chinese)
王宏伟, 陈科, 尤云祥, 等. 密度分层流体中不同潜深拖曳回转体激发内波特性实验 [J]. 科学通报, 2017, 62(19): 2132–2148.
- [13] Zhao Yunfeng, Li Yejin, Zhang Yin, et al. A space-based infrared detection scene generation system for moving objects with sea background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 1019–1025. (in Chinese)
赵云峰, 李夜金, 张寅, 等. 海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1019–1025.