

文章编号: 1007-7294(2024)07-1008-10

冰脊对极地冰下航道流场特性影响研究

孙 盛, 石玉云, 李志富

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212001)

摘要:冰脊是极地冰层下表面典型结构特征之一,掌握冰脊与冰下流场的相互作用规律,对于理解极地冰下航道通航特性及近冰面潜水器操纵运动具有重要的指导意义。为了探究冰脊对近冰面流场的影响及作用范围,本文基于极地实测数据建立五组典型分布间距冰脊流场,利用Fluent软件平台,通过稳态求解Reynolds应力方程模型(RSM)进行数值研究,重点分析冰脊间距对冰下流场特性的影响规律。同时,探究冰脊对冰下流场干扰的辐射深度。研究表明:连续冰脊对冰脊间尾涡具有拉伸效应;根据冰脊对冰下流场的干扰程度,辐射深度可分为强辐射区、稳定辐射区和无影响区三个区间。

关键词:冰脊;冰下航道;通航特性;RSM;尾涡

中图分类号: U674.76 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.07.004

Influence of ice ridges on the flow field characteristics of the polar subglacial channel

SUN Sheng, SHI Yu-yun, LI Zhi-fu

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Ice ridges are one of the typical features of polar ice underlying surface. Understanding the interaction between ice ridge and fluid flow is important for the navigation of submersibles. Five groups of typically spaced ice ridges were established based on the polar field data to investigate the influence of ice ridges on the fluid flow beneath the ice surface and its influence range. By solving the steady-state Reynolds stress equation model (RSM) through Fluent software, the effect of ice ridge spacing on fluid flow beneath the ice was studied. The relationship between spacing and wake vortex oscillation was explored. The radiation depth of ice ridge interference with the ice flow field was also studied. The numerical result shows that the continuous ice ridges have a tensile effect on the tail vortex. Depending on the level of interference, radiation depth can be divided into three ranges: strong radiation area, stable radiation area and no influence area.

Key words: ice ridge; subglacial navigation; seaworthiness; RSM; trailing vortex

0 引 言

北极航道的开发对我国经济发展和国家安全具有重要意义^[1],其中冰下航道通航性研究是极地开发的一个重要方面。受海洋动力环境影响,北冰洋形成了复杂的冰层结构,其中冰脊是其典型结构特

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071162)

作者简介: 孙 盛(1993-),男,硕士;

李志富(1990-),男,博士,教授,通讯作者,E-mail: zhifu.li@hotmail.com。

征之一。Leppäranta^[2]通过大量数据证实,北冰洋大部分海域冰脊的分布占全部冰面的10%~40%。掌握冰脊与冰下流场的相互作用规律,对于理解极地冰下航道适航特性及近冰面航行潜水器操纵运动具有重要的指导意义。

冰脊主要包括脊帆和龙骨,其中龙骨由固结层和碎冰两部分组成^[3]。Timco和Burden^[4]在1997年分析了一年海冰冰脊和多年海冰冰脊的统计数据,得出了脊帆高度与龙骨深度的关系,为冰脊水下特性的研究奠定了基础。Johnston等^[5]对比了一年冰与多年冰的冰脊厚度,发现多年冰脊的厚度主要集中在40~50 m的范围内。孙波等^[6]利用雷达探测分析了北冰洋海冰下表面形态特征,其结果直观地展现了海冰截面结构。随着有关北极海冰和冰脊形态科考研究的逐渐深入,关于冰脊水动力特性研究具备了一定的数据基础。在冰脊水动力研究中,洋流的拖曳力是关键问题之一,根据海冰拖曳系数参数化的思想,冰-水总拖曳力由摩拖曳力和形拖曳力两部分组成^[7]。摩拖曳力主要是指由海冰表面均匀分布的小凸起物引起的剪切力。孙惠等^[8]通过稳态求解RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,与实验对比分析了冰底形态扰动流场特性,发现同种水深下,粗糙冰底浮冰模型的冰下流场受影响区域范围随底纹角度的增加而增大。形拖曳力描述的是由海冰表面非均匀分布的较大凸起物(如冰侧、冰脊)引起的流场变化而导致的水平方向压力差^[9]。卢鹏等^[10]综合考虑冰脊高度、冰底粗糙度及浮冰尺寸等影响,建立了各部分分量拖曳力的冰-水拖曳系数参数化模型。此外,Baines^[11]根据无量纲拖曳速度和冰脊入水深度的变化,研究了分层流下冰脊的水动力特性,并将双层流流况分为亚临界区、跨临界区和超临界区。Mortikov^[12]利用浸没边界法对双层流体中的冰脊拖曳力特性进行了数值研究,并重点分析了波浪的影响。

目前,对于极地冰下航道流场特性问题,已有一定认识,但主要限于单个冰脊对流场的扰动及冰脊尺寸对冰脊所受拖曳力分析^[13]。为了掌握极地冰下航道适航特性,确定适航区域,并进一步探究适航区域的流速及压力特性,本文基于极地实测数据建立五组典型分布间距冰脊流场。由于适航区域可近似处理为流态稳定的层流场,因此通过稳态求解Reynolds应力方程模型(RSM),重点研究不同冰脊间距的适航区范围、冰脊间距对适航区流场特性的影响规律,以及不同流速下的冰下适航区流场特性。

1 数值方法

1.1 模型概述

对湍流流动进行适当的简化处理,从而解析流场的特征,是湍流计算模型的核心思想。基于系综平均化方法^[14]的雷诺平均(RANS)模型在工程上有较强的适用性,将流体控制方程中的各项分解为时间平均项和脉动项两部分,得到雷诺时均方程组,其表达式^[14]如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

式中: \bar{u}_i 为时均值; u'_i 为脉动值; $-\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项,来自于湍动过程中不规则的脉动。

雷诺应力的求解是雷诺时均方程组封闭的主要问题,由此产生了两类RANS模型:基于Boussinesq假设的涡黏性模型和直接推导雷诺应力输送方程的RSM模型。在冰脊流场的研究中普遍采用涡黏性模型中的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,RNG $k-\varepsilon$ 模型用函数形式替代了标准 $k-\varepsilon$ 模型中湍动能产生项的常数系数,使得在求解瞬变流以及流线弯曲的情况时更接近真实,但其本质依旧是用黏性应力比拟雷诺应力,从而确定雷诺应力项的表达形式,即

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \tag{3}$$

式中, ν_t 为涡黏性系数, δ_{ij} 为克罗内克函数, k 为湍动动能。为封闭方程组, 需用湍动动能 k 和湍动动能耗散 ε 表示涡黏性系数 ν_t , 而在湍动动能 k 的输送方程中, 湍动动能的生成项会过大估计与壁面的冲突, 导致整体流动的失真, 湍动动能的生成项是主要的误差来源。为了得到更接近真实的冰脊近冰面流场, 本文采用 RSM 模型, 即在推导得出雷诺应力输送方程后, 再对之进行进一步建模, 实现方程组封闭^[15]。

1.2 RSM 模型

通过不可压纳维斯托克斯方程和式(2)的雷诺时均方程可推导出雷诺应力输送方程:

$$\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} = P_{ij} + \phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \tag{4}$$

式中, P_{ij} 为雷诺应力的产生项,

$$P_{ij} = -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \tag{5}$$

ϕ_{ij} 为压力应变项,

$$\phi_{ij} = \overline{\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \tag{6}$$

D_{ij} 为扩散项,

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(-\overline{u'_i u'_j u'_k} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_i} \delta_{jk} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \right) + \nu \frac{\partial^2 \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k^2} \tag{7}$$

ε_{ij} 为耗散项,

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \tag{8}$$

2 算例设置

2.1 模型简化及网格划分

根据北极冰脊形态参数有关实地科考数据, 建立冰脊模型, 如图1所示, 其中, L 为冰脊间距, H_s 为冰脊龙骨深度, H_r 为冰脊脊帆高度。统计数据^[2-5]显示, H_s 的范围一般在 0~3 m 内, H_r 集中分布在 0~15 m 内, L 通常是 H_s 的 50~10 000 倍, 且北冰洋大部分海域冰脊的分布占全部冰面的 10%~40%。

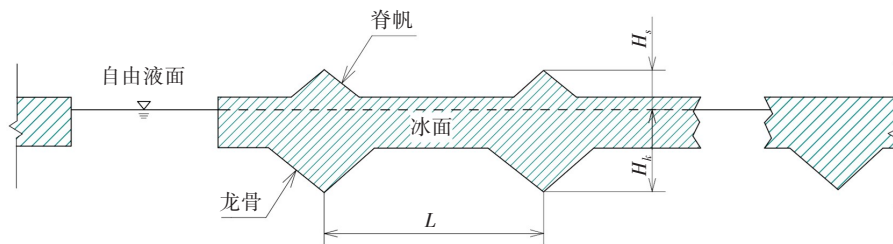


图1 冰脊物理模型及参数表示

Fig.1 Physical model and parameter representation of the ice ridge

本文主要探究冰脊下近冰面流场的特性, 重点分析冰脊间间距及水流速度对流场特性的影响, 因此, 简化冰脊模型, 建立如图2所示的计算模型。利用 Fluent 软件, 入口边界及下边界设置为速度入口

条件;出口设置为自由出流边界条件;共设置三个相同尺寸冰脊,冰脊宽为50 m、高为15 m,冰脊间距为 L ;冰脊下表面为无滑移壁面,采用标准壁面函数。

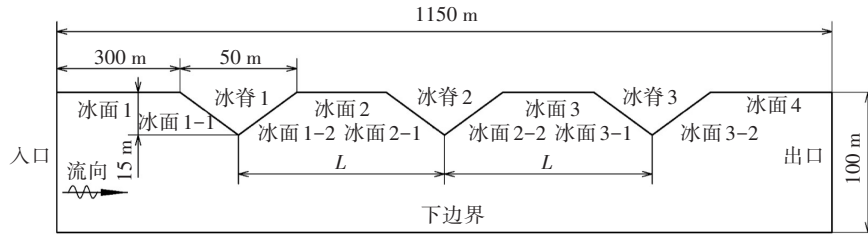


图2 冰脊计算模型示意图

Fig.2 Sketch of the ice ridge model for numerical computation

速度入口边界条件涉及的流动参数如表1所示。其中,雷诺数计算公式为 $Re=uh/\nu$,特征长度 h 定义为冰脊入水深度,特征速度 u 为进口平均流速, ν 为1℃时水的运动粘性系数, I 为湍流强度。

表1 速度入口参数

Tab.1 Velocity inlet parameters

$u/(m \cdot s^{-1})$	Re	I	$k/(m^2 \cdot s^{-2})$	$\epsilon/(m^2 \cdot s^{-2})$
0.1	873 616.7	0.028 937	1.256 03 E-05	6.966 17 E-09
0.3	2 620 850.3	0.025 224	8.589 41 E-05	1.245 77 E-07
0.5	4 368 083.9	0.023 664	2.099 90 E-04	4.762 01 E-07
0.7	6 115 317.4	0.022 689	3.783 75 E-04	1.151 80 E-06
1.0	8 736 167.7	0.021 700	7.063 19 E-04	2.937 61 E-06

本文采用结构化网格生成方式建立离散域。为了精确地模拟近冰脊区域的分离流动及尾涡细节,在近冰面区域进行自适应加密,确保 y^+ 值在300以内。图3为 $L=200$ m时整体网格及局部加密网格示意图。

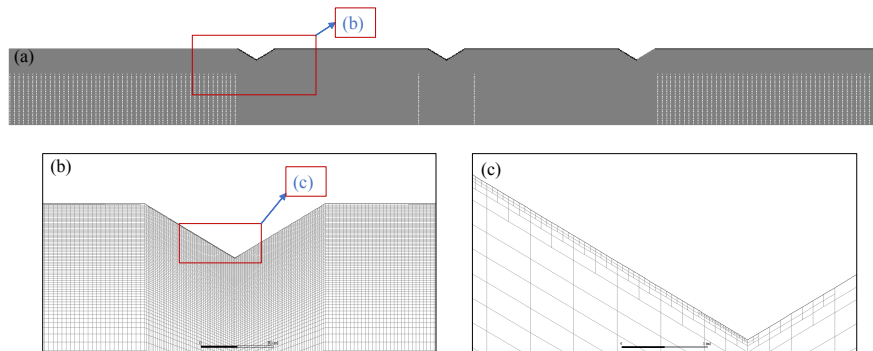


图3 冰脊网格示意图

Fig.3 Diagram of the mesh of the ice ridge

2.2 网格无关性及收敛性分析

五组计算模型的冰脊尺寸与数量相同,即五组模型网格的生成方式及特征参数相同。因此,可以采用其中一组模型做网格无关性检验。选取 $L=200$ m的模型建立A/B/C/D四套网格做无关性分析,网格参数如表2所示。迭代10 000次,监测冰层下表面所受合力,做收敛性验证。网格无关性及收敛性分析的统计结果如图4~5所示。图4中四条曲线分别表示四套网格冰面下表面所受合力均值随迭代次数的变化规律,四套网格在迭代6000次左右时收敛。图5为四套网格在迭代过程中,监测每次迭代求解出的冰层下表面总受力的正态分布统计情况。结果显示,随着网格的细化,总受力的期望值趋于稳定,并且稳定在2000 N左右。因此,网格C在保证精确性的同时实用性强,为最优解,迭代6000次可保证收敛。

表 2 L=200 m 工况下网格无关性参数
Tab.2 Meshes of ice ridge with spacing of 200 m

网格编号	进口边节点数/个	冰脊边节点数/个	脊间边节点数/个	网格数/个
A	50	25	100	42 960
B	100	50	200	120 410
C	150	100	250	240 410
D	200	150	300	400 410

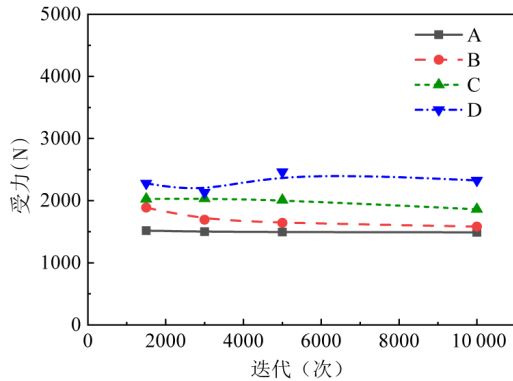


图4 迭代收敛性验证

Fig.4 Validation of iterative convergence

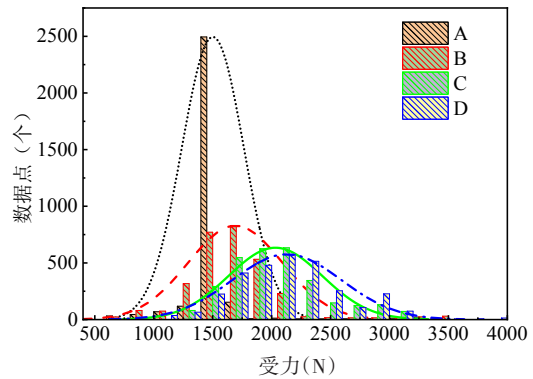


图5 网格无关性验证

Fig.5 Grid independence verification

3 计算结果及分析

设定两组计算工况：第一组，参考北极海冰漂移速度，设定流速为 0.3 m/s，计算 1-L~5-L 五组冰脊间距（分别对应冰脊间距 L=100、125、150、175、200 m）下的流场；第二组，针对冰脊间距 L=200 m 的情况，分别计算 u=0.1、0.3、0.5、0.7、1.0 m/s 五组流速的流场。

3.1 拉伸效应

观察冰脊间流场，在冰脊尖端会发生流场分离及再附着的现象，并在冰脊背风面产生漩涡即尾涡。由于冰脊的存在，尾涡的形态受到冰脊的干扰，其形态与冰脊间距和冰脊龙骨深度的比值有关，1-L~5-L 五组工况下冰脊间距/龙骨深度比分别为 2、2.5、3、3.5 和 4。

图 6 是五组冰脊间距下冰面 2 下表面的流场情况对比，随着冰脊间距的增大，尾涡的中心略微向下游移动，尾涡逐渐被拉伸，当冰脊间距为 150 m 时，拉伸效应达到最大，继续增大冰脊间距，拉伸效应逐渐减弱。由 5-L 工况结果可知，宽度为 50 m，龙骨深度为 15 m 的冰脊，在水流速度为 0.3 m/s 时，产生的尾涡尺度沿流动方向在 150 m 左右。此外，冰脊间距对尾涡的垂向尺度并无明显影响。

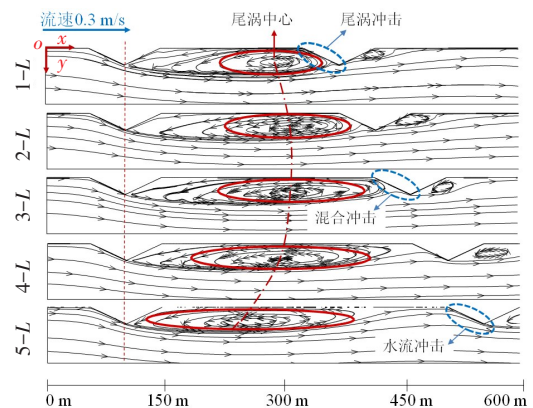


图6 冰面2冰脊间尾涡对比

Fig.6 Comparison of tail vortices under ICE 2

图 7 分别是五组冰脊间距下在迭代 6000 次的过程中，监测每次迭代求解出的冰面 2-1 的受力，所得后 4500 组数据的正态分布统计情况。其中，分布的期望值反映了监测面所受冲击力的强度，随着冰脊间距的增大，冰面 2-1 面受力逐渐减小。同时对比图 6 可以发现，1-L~3-L 三组工况下冰面 2-1 面

处于尾涡区,主要受尾涡的冲击力;4-L和5-L两组工况下冰面2-1面远离尾涡区,主要受水流的冲击力。由此可知,对于本文所设置的冰脊来讲,在水流速度为0.3 m/s时,尾涡对冰脊的冲击力大于水流对冰脊的冲击力,且尾涡中心与冰脊受力面距离越近冲击力越大。

综上所述,连续冰脊对冰脊间尾涡有拉伸效应,在一定范围内,随着冰脊间距的增大,拉伸效应逐渐增强;在本文的工况下,尾涡对冰脊的冲击力大于水流对冰脊的冲击力,且尾涡中心与冰脊受力面距离越近冲击力越大。

3.2 辐射深度

由于冰脊绕流的影响,近冰面的流场变化剧烈,因此研究冰脊干扰的辐射深度对潜水器近冰面航行有重要意义。本文通过数值计算发现,冰脊干扰的辐射深度与冰脊尺寸相关。

如图8所示,在计算域中选两组垂直于流动方向的截面1和截面2,分别位于冰面2的起始处和1/2 L处。图9是五组间距下截面1和截面2的速度分布情况,位于冰脊间前端的截面流场在水深25 m内影响明显,流速随水深变化剧烈;冰脊间中部的截面流场在水深35 m内影响明显,两截面在30~90 m之间流速有所增大,但随水深无明显变化,90 m以下冰脊对速度场干扰很小。

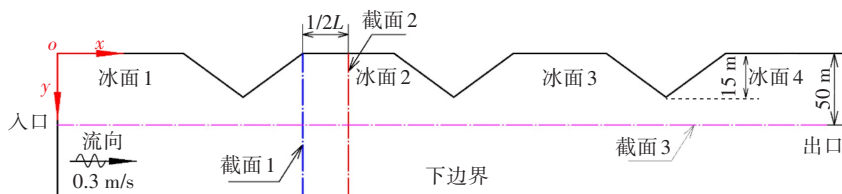


图8 截线坐标示意图

Fig.8 Diagram of transversal coordinates

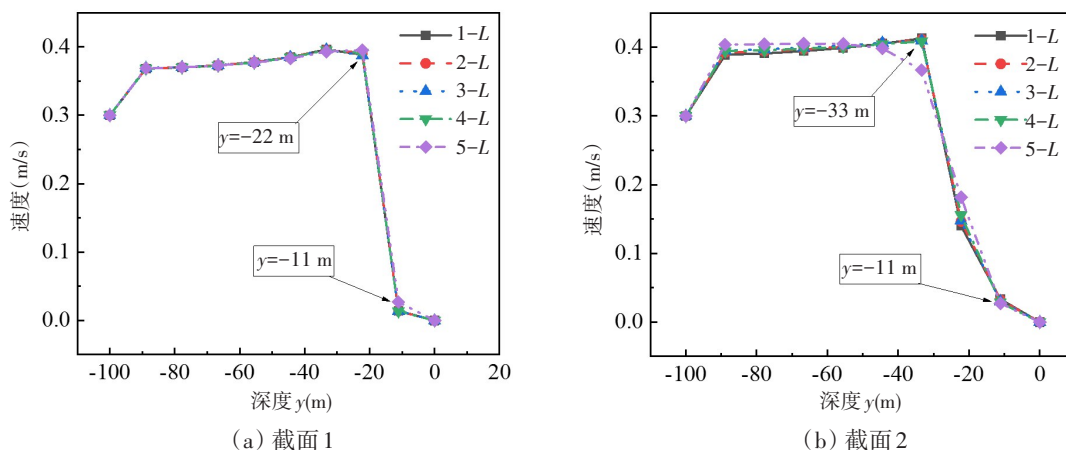


图9 截面1和截面2的速度分布情况

Fig.9 Velocity distribution of Section 1 and Section 2

图10所示为五组冰脊模型的压力场结果。由于冰脊的存在,水流在冰脊迎流面尖端部位与冰脊分离,在冰脊背流面形成低压区,使得冰脊后方的水流在竖直方向产生较大速度梯度,从而形成尾涡区。此外,冰脊迎流面的高压区压力场向冰脊前下方辐射,使冰脊下方的流场受到干扰。图11是五组间距下截面1和截面2的压力分布情况,与速度场结论基本一致,30 m以上的压力场分布有明显扰动,主要受尾涡的影响。

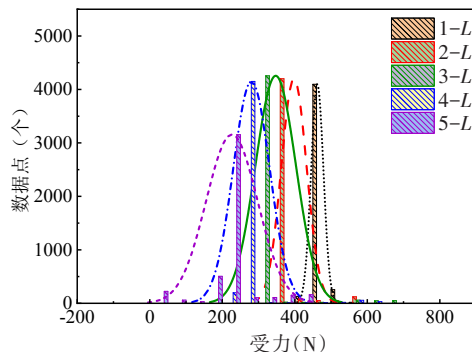


图7 各工况下冰面2-1受力分布

Fig.7 Stress distribution of ICE 2-1

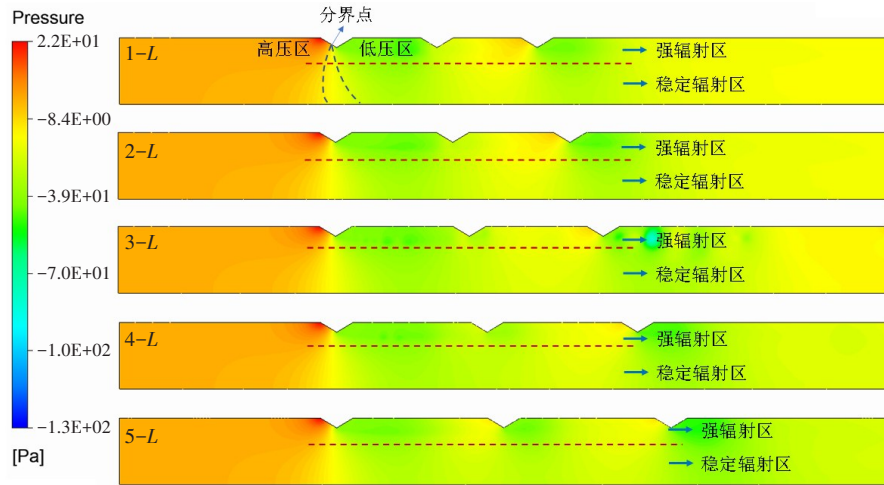


图 10 各工况压力分布

Fig.10 Pressure distribution under various conditions

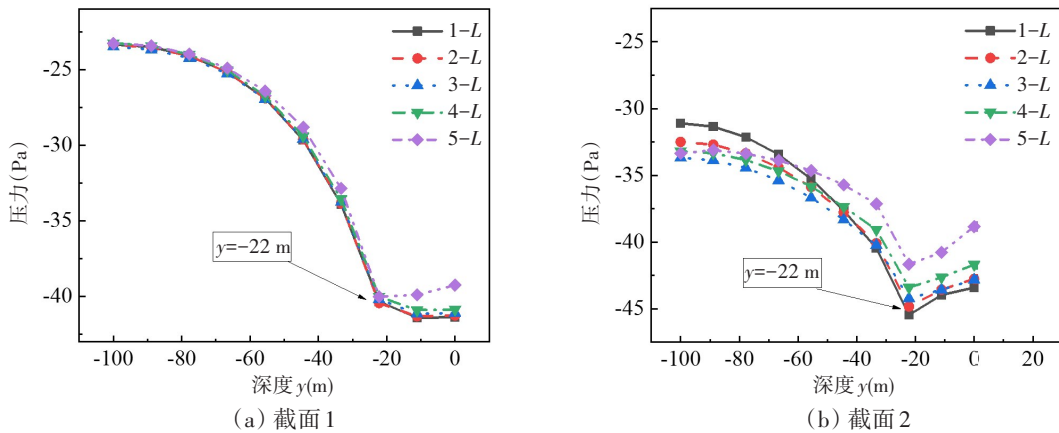


图 11 截面 1 和截面 2 的压力分布情况

Fig.11 Pressure distribution of Section 1 and Section 2

由上述结论可知,水下 30~90 m 为稳定干扰区域,在此区域中,冰脊扰动对速度场和压力场的影响随深度的增加而稳定减弱。因此,截取计算域中水深 50 m 的等值线截面 3,分析其流场特性沿流动方向的变化。结果如图 12 所示,流场随冰脊的出现产生波动,随着冰脊间距的增大,速度和压力的波动区间逐渐增大。

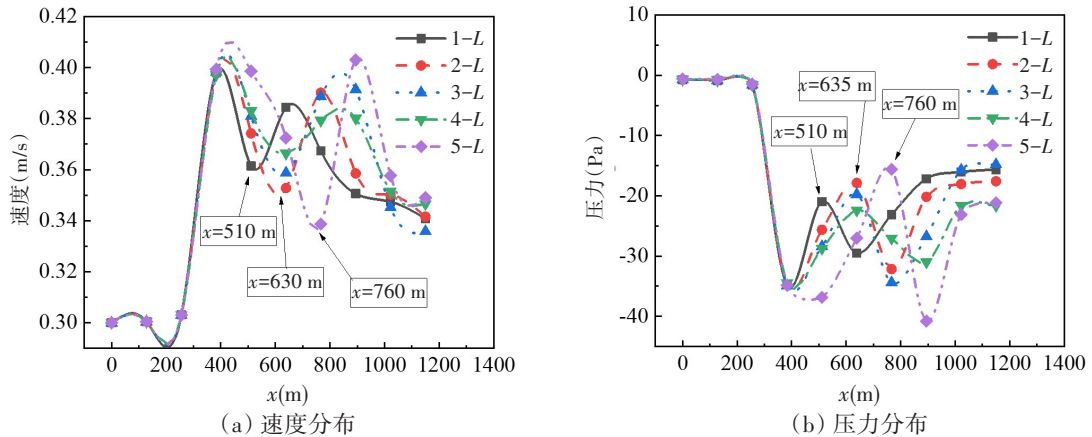


图 12 截面 3 的速度和压力分布

Fig.12 Velocity and pressure distribution of Section 3

3.3 流速影响

为了进一步探究流速对冰下流场的影响,针对冰脊间距 $L=200\text{ m}$ 的情况,分别计算五种流速 $u=0.1、0.3、0.5、0.7、1.0\text{ m/s}$ 的流场。图13为五种流速下流场速度分布。由图可知,流速对流场形态无明显影响。

图14是五组流速下载面2的压力和速度分布情况,五组流速下冰下流场的影响深度基本一致,但影响强度随流速增大而增大。图9与图14中90 m至100 m深度的速度变化较为明显,这是由于本文设定整体流场流速为理想的均匀流动,下边界给定环境流速与进口相同,因此,在90 m至100 m形成了较大的速度梯度。

图15是五组流速下载面3的压力和速度分布情况,五组流速下冰下

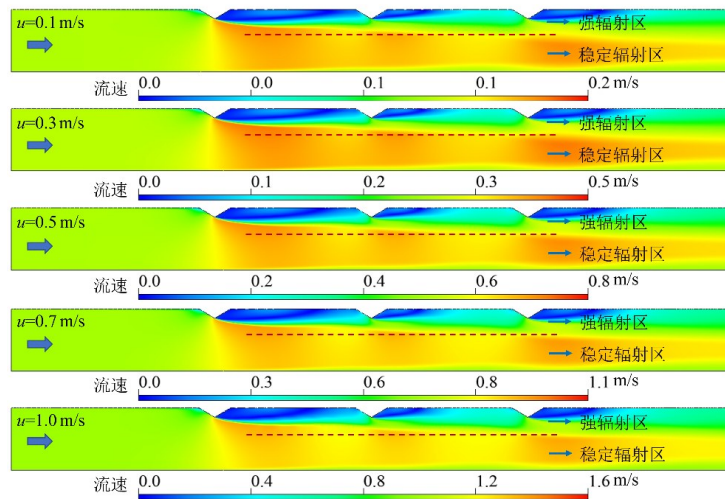
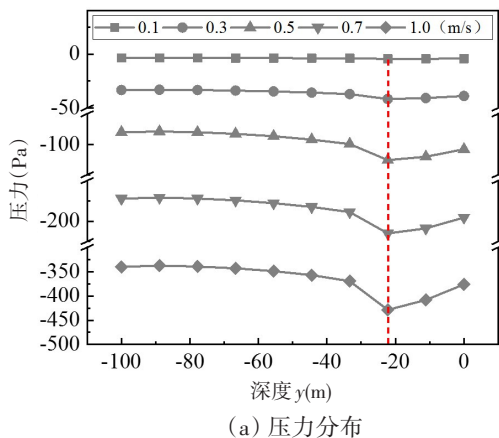
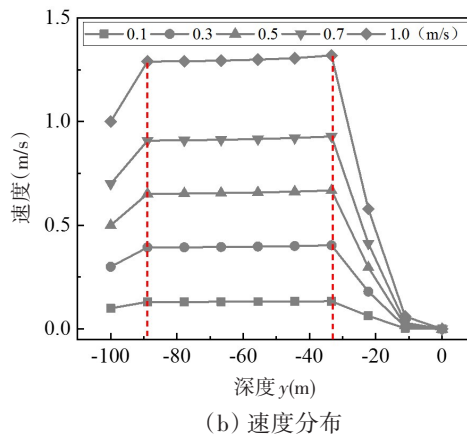


图13 各工况流场速度分布

Fig.13 Velocity contour of the flow field



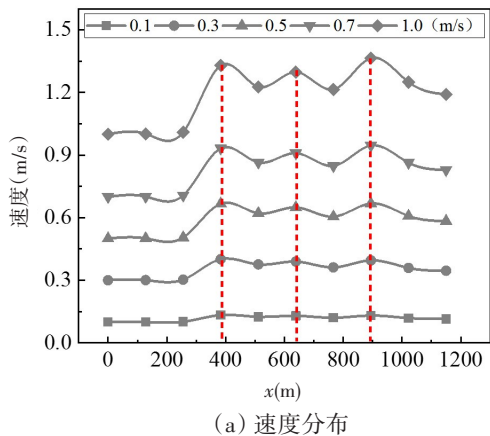
(a) 压力分布



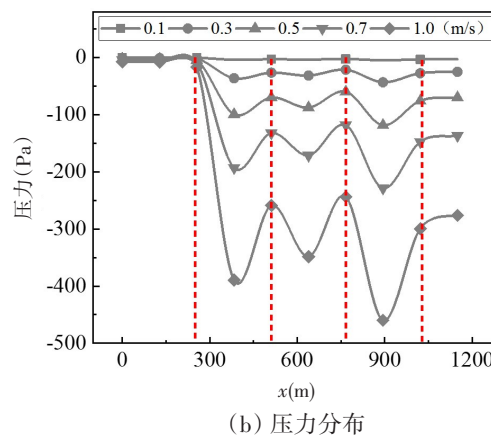
(b) 速度分布

图14 截面2的压力和速度分布

Fig.14 Pressure and velocity distribution of Section 2



(a) 速度分布



(b) 压力分布

图15 截面3的压力和速度分布

Fig.15 Pressure and velocity distribution of Section 3

流场在 50 m 深度时,沿流动方向的压力和速度分布呈现相同的变化规律,但变化的强度随流速增大而增大。

4 结 论

本文对五组典型分布间距冰脊流场进行了数值模拟,分析了冰脊间尾涡的变化特征和冰脊间流场截面的流态特性,研究发现:

(1) 连续冰脊对冰脊间尾涡有拉伸效应,在一定范围内,随着冰脊间距的增大,拉伸效应逐渐增强;宽度为 50 m,龙骨深度为 15 m 的冰脊,在水流速度为 0.3 m/s 时,尾涡对冰脊的冲击力大于水流对冰脊的冲击力,且尾涡中心与冰脊受力面距离越近,冲击力越大。

(2) 冰脊对冰下流场干扰的辐射深度受冰脊间尾涡的影响,冰脊龙骨深度为 15 m,冰脊宽度为 50 m 时,根据冰脊对冰下流场的干扰程度,可将其辐射深度分为三个区域:0~30 m 为强辐射区,处于尾涡区域;30~90 m 为稳定辐射区,该区域流场无明显扰动涡,冰脊扰动对速度场和压力场的影响随深度的增加而减弱;90 m 以下为无影响区。

(3) 流速对辐射区域的范围无明显影响,但与辐射区域的扰动强度密切相关。

本文所得结论对理解极地冰下航道适航特性及近冰面航行潜水器操纵运动具有重要的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 季 青,董 江,庞小平,等. 北极东北航道夏季海冰冰情与适航性分析[J]. 船舶力学, 2021, 25(8): 991-1000.
Ji Qing, Dong Jiang, Pang Xiaoping, et al. Analysis of sea ice conditions and navigability of Arctic Northeast Passage in summer[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(8): 991-1000. (in Chinese)
- [2] Strub-Klein L, Sudom D, A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 82: 94-109.
- [3] ISO 19906-2019. Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures (Second edition)[S]. International Standardization Organization, 2019.
- [4] Timco G W, Burden P R. An analysis of the shapes of sea ice ridges[J]. Cold Regions Science & Technology, 1997, 25(1): 65-77.
- [5] Johnston M, Masterson D, Wright B. Multi-year ice thickness: Knowns and unknowns[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, 2009.
- [6] Sun Bo, Wen Jiahong, et al. Sea ice thickness measurement and its underside morphology analysis using radar penetration in the Arctic Ocean[J]. Science in China Series D Earth Sciences, 2003, 46(011): 1151-1160.
- [7] Arya S P S. A drag partition theory for determining the large-scale roughness parameter and wind stress on the Arctic pack ice[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(24): 3447-3454.
- [8] 孙 惠,卢 鹏,李志军. 冰下流场动力学特性的数值模拟研究[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(03): 69-77.
Sun Hui, Lu Peng, Li Zhijun. Numerical simulation on dynamic characteristics of flow field under ice[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(03): 69-77. (in Chinese)
- [9] Andreas, Edgar L. Air-ice drag coefficients in the western Weddell Sea: 2. A model based on form drag and drifting snow[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1995, 100(C3): 4833-4843.
- [10] Lu Peng, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. A parameterization of the ice-ocean drag coefficient[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(7): C07019.
- [11] Baines P G. A unified description of two-layer flow over topography[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 146(1): 127-167.

-
- [12] Mortikov E V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in a stratified flow[J]. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, 52(1): 108–115.
- [13] Pite H D, Topham D R, Van H. Laboratory measurements of the drag force on a family of two-dimensional ice keel models in a two-layer flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 22(12): 133–143.
- [14] 刘 京. 建筑环境计算流体力学及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2017.
Liu Jing. *Computational fluid dynamics in the built environment and its applications*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017. (in Chinese)
- [15] Launder B E. Second-moment closure: Methodology and practice[R]. UMIST Rep No. TFD/82/4, 1983.