

引用格式: 柏铁朝, 许建, 王国栋, 等. 近冰面航行潜艇阻力及绕流场分析[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 36–48.

BAI T C, XU J, WANG G D, et al. Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(2): 36–48.

近冰面航行潜艇阻力及绕流场分析



扫码阅读全文

柏铁朝¹, 许建¹, 王国栋¹, 余琨¹, 胡笑寒²

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

2 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: [目的] 采用数值模拟方法探究潜艇近冰面航行时的水动力性能。[方法] 选取 Suboff 全附体潜艇模型为研究对象, 在 STAR-CCM+ 软件中采用 RANS 方法, 再结合 SST $k-\omega$ 湍流模型和体积分法计算艇体的水动力性能。然后进行网格无关性验证以及近冰面水动力特性分析的方法验证, 以确定计算方法的有效性。[结果] 结果表明, 潜艇近冰面航行时, 潜艇的总阻力系数 C_T 在同一弗劳德数下随潜深的增加而减小, 在同一潜深下随弗劳德数的增加而减小; 在同一弗劳德数下, 当无量纲深度大于 1.63 时, 潜深几乎不影响艇体的阻力系数。[结论] 研究表明, 潜艇的总阻力系数受弗劳德数以及潜深的影响较大, 随着潜深的增大, 潜深对阻力系数的影响将逐渐减小。

关键词: 潜艇; 冰面; 水动力; 扰流场; 数值模拟

中图分类号: U661.31¹

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01975

Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface

BAI Tiechao¹, XU Jian¹, WANG Guodong¹, YU Kun¹, HU Xiaohan²

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: [Objectives] This paper studies the hydrodynamic performance of the submarine sailing near the ice surface using numerical simulation method. [Methods] the Suboff full-appended model, RANS method, SST $k-\omega$ turbulence model and volume of field method are used to calculate the hydrodynamic performance of the submarine in the STAR-CCM+ software. The effectiveness of the calculation method is guaranteed by the method of grid independence verification and the method of hydrodynamics analysis near the ice surface. [Results] The results show that when the submarine sails under ice surface, the total resistance coefficient of submarine decreases with the increase of the submergence depth at the same Froude number, and decreases with the increase of Froude number at the same depth. In addition, when the dimensionless depth is greater than 1.63, the submergence hardly affects the drag coefficient. [Conclusions] Studies have shown that the total drag coefficient of submarine is greatly influenced by Froude number and submergence depth. With the increase of submergence depth, the influence of submergence depth on drag coefficient decreases gradually.

Key words: submarine; ice surface; hydrodynamics; flow field; numerical simulation

0 引言

作为海军的重要作战力量, 潜艇的隐蔽性使

其具有强大的威慑力, 其探测与反探测研究一直受到海军强国的高度重视^[1]。极地环境的复杂性使得潜艇在冰区的航行情况与自由水域相比差异

收稿日期: 2020-05-27

修回日期: 2020-09-21

网络首发时间: 2021-03-04 17:28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679052, 51809055, 51909043, 51639004); 国防基础科研计划资助项目(JCKY2016604B001); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2018026)

作者简介: 柏铁朝, 男, 1984年生, 博士生, 高级工程师。

许建, 男, 1963年生, 博士, 研究员。

*通信作者: 柏铁朝

较大。冰面的覆盖改变了水面处的边界条件,并且考虑到潜艇航行时产生的挠曲重力波,有可能导致冰面破碎,从而使航行情况更为复杂^[2]。因此,研究挠曲重力波对冰面的影响,对执行军事任务具有重要意义,对潜艇近冰面航行的水动力特性分析也十分重要。

在潜艇水动力分析研究初期,主要是致力于无界黏性流域条件下的情况。截至20世纪80年代中期,许多国家进行了大量的数值研究,其在原有势流计算方法和切片理论的基础上予以发展,考虑了自由液面带来的影响^[3]。至20世纪80年代后期,美国国防先期研究计划局(DARPA)发起建立了带各种典型附体的轴对称回转体流场试验数据库^[4]。近年来,针对潜艇近自由液面航行的研究开始逐渐增多,并以数值研究为主。Jagadeesh等^[5]基于RANS方法,讨论了自由液面对回转体潜艇模型航行的影响。Saout等^[6]针对潜艇近自由液面航行时的稳定性进行了研究。Dawson^[7]就浸没深度、速度和细长比对流线型对称体潜艇与自由液面的相互作用开展了相关试验和数值研究。

我国对潜艇水动力性能的研究主要集中在对Suboff潜艇全附体模型阻力、升力、表面压力及精细流场的数值计算上。李艳等^[8]基于RANS方法,将湍流模型与壁面函数法相结合,对Suboff全附体潜艇模型进行了数值模拟,并将计算值与试验值进行对比,验证了模拟方法的准确性。张楠等^[9-10]基于RANS方法,结合流体体积(volume of fluid, VOF)法,分别计算了Suboff近自由液面航行时的阻力以及各潜深下的增阻系数、艇-桨干扰特性,并讨论了围壳对自由液面兴波的影响。邱云明和邓锐^[11]对Suboff全附体潜艇模型近水面航行时的兴波进行了多工况下的计算,并对比了各弗劳德数下的自由液面波形和中纵剖面上的波高。

然而,无论国内还是国外,少有关于Suboff潜艇模型在冰面下航行时的流场特性及其规律研究。而对冰区潜艇近冰面航行进行数值模拟,掌握其阻力与流场特性进而探索挠曲重力波破冰方法意义重大。

为了系统分析潜艇近冰面航行时的阻力及流场分布规律,本文拟以Suboff全附体潜艇模型为研究对象,在STAR-CCM+软件中应用RANS方法计算艇体的水动力性能,然后对不同潜深、航速等条件下艇体近冰面航行时的阻力系数、表面压力系数、表面摩擦系数以及艇体绕流场特性进行分析。

1 数值方法

1.1 基本控制方程

对于计算流体力学问题,相关的控制方程包括质量守恒方程和动量方程。

质量守恒方程:

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

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{xi}}{\partial x} + \\ \frac{\partial \tau_{yi}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z} + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; u_i 为速度矢量在3个方向的速度分量; x_i 为基于速度分量的3个方向的位移; \mathbf{u} 为速度矢量; p 为压强; F_i 为质量力; t 为时间; τ_{xi} , τ_{yi} , τ_{zi} 为黏性应力 $\boldsymbol{\tau}$ 的分量。

1.2 湍流模型

本文所使用的湍流模型为SST $k-\omega$ 模型^[12-13]。其中湍流动能 k 的输运方程为:

$$\rho \frac{dk}{dt} + \rho \frac{\partial(k\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3)$$

耗散率 ω 的输运方程为:

$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \rho \frac{\partial(\omega\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (4)$$

式中: x_j 为基于湍流动能和耗散率的3个方向的位移; G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能; G_ω 为由 ω 方程产生的湍流动能; T_k 和 T_ω 分别为 k 和 ω 的扩散率; Y_k 和 Y_ω 为由扩散产生的湍流; D_ω 为正交发散项。

2 物理条件设置

2.1 计算对象参数

本文以美国DARPA提出的Suboff全附体潜艇模型为研究对象,其几何模型及参数分别如图1和表1所示。

2.2 计算域及边界条件设置

由于所采用的Suboff全附体潜艇模型和流域



图1 Suboff潜艇几何模型

Fig. 1 Geometric model of Suboff submarine model

表1 Suboff全附体潜艇模型几何参数^[10]

Table 1 Geometric parameters of Suboff submarine model

参数	数值
总长/m	4.356
艏部长/m	1.016
平行中体长/m	2.229
艉部长/m	1.111
中部最大直径/m	0.508
指挥室围壳高/m	0.206
最大厚度/m	0.066

为对称的,所以通过设置对称面计算一半的流域即可。

潜艇近冰面航行时,在潜艇穿过冰盖下某一位置的瞬间,可以认为冰盖尚未变形,或者是其变形对潜艇绕流场的影响微弱,因此,将艇体上方边界设置为无滑移壁面边界。为了模拟无限流域的物理背景,将来流出口设置为压力出口,潜艇中纵剖面设置为对称面,潜艇表面设置为无滑移壁面。为保证计算稳定性,其余边界设置为速度进口。具体边界条件的设置如图2所示。图中, L 为艇体长度, d 为模型潜深大小。

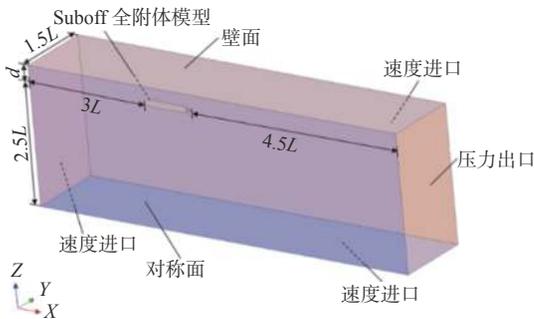


图2 Suboff潜艇近冰面航行边界条件

Fig. 2 The Suboff submarine model's boundary condition when sailing near the ice surface

2.3 网格收敛性分析

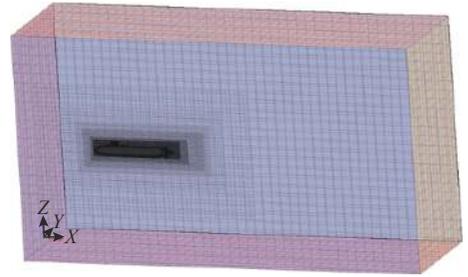
本文采用3种不同的网格尺寸进行验证。在划分网格时,通过调整网格的基本尺寸,可以在不改变网格相对尺寸的条件下,改变网格的疏密程度。对艇体加密时,选择面网格加密方法,并将艇体表面分割为指挥室围壳、尾翼和艇体3部分进行计算。采用的网格分为3套,其基础尺寸分别为0.8、1.0和1.2 m,各基础尺寸下的网格数量信息(半侧计算域)如表2所示。边界层取10层, $Y+$ 值为30,考察艇体前进方向所受的阻力。计算域的网格划分如图3所示。

目前,直航全附体潜艇阻力测试普遍参照的是1998年美国海军水面战中心卡德洛克分部

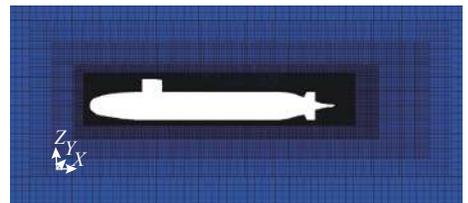
表2 不同基础尺寸下的网格数量

Table 2 The number of grids with different base sizes

	基础尺寸/m		
	0.8	1.0	1.2
艇体	14.94×10^4	10.57×10^4	7.87×10^4
围壳	1.28×10^4	0.96×10^4	0.77×10^4
尾翼	2.68×10^4	1.92×10^4	1.48×10^4
流域	695.84×10^4	429.05×10^4	286.45×10^4
合计	714.74×10^4	442.50×10^4	296.57×10^4



(a) 计算域整体网格



(b) 艇体周围网格加密区

图3 计算域网格划分

Fig. 3 Grid division of computational domain

(NSWC)^[14]提出的不同航速下所对应的总阻力试验值。选择航行速度 $V=3.05$ 和 5.14 m/s进行网格无关性验证时,各网格尺度下的计算结果及误差如表3和表4所示。

表3 $V=3.05$ m/s时的阻力计算值及误差Table 3 Calculated resistance values and errors at $V=3.05$ m/s

基础尺寸/m	仿真阻力值/N	试验阻力值/N	误差/%
0.8	98	102.3	0.8
1.0	103.1	102.3	4.2
1.2	119	102.3	16.3

表4 $V=5.14$ m/s时的阻力计算值及误差Table 4 Calculated resistance values and errors at $V=5.14$ m/s

基础尺寸/m	仿真阻力值/N	试验阻力值/N	误差/%
0.8	255.8	283.8	1.48
1.0	288	283.8	2.82
1.2	322.8	283.8	13.7

无关性仿真计算结果与实体试验的比较说明网格尺寸为单调收敛,将选择误差最小的基础尺寸0.8 m作为Suboff潜艇模型变参数仿真计算的

网格划分参数。

2.4 计算方法验证

为了验证本文数值模拟方法的可靠性,设置了多个航行速度,用以计算无界绕流条件下 Suboff 全附体潜艇模型的直航阻力值,并与文献 [4] 中的试验数据进行了对比,结果如图 4 所示。

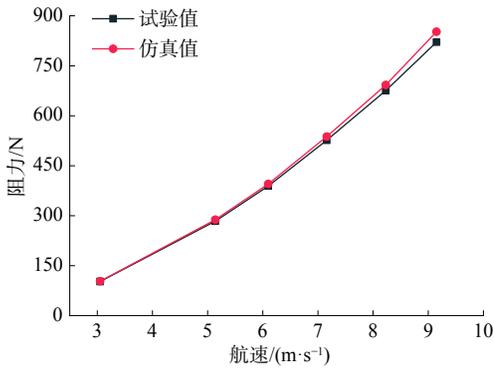


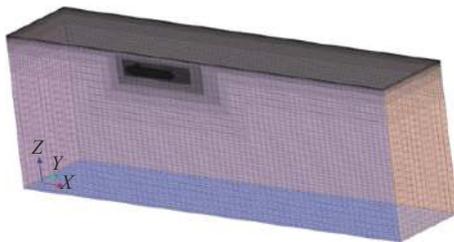
图4 试验与数值模拟阻力值对比

Fig. 4 Comparison of experimental and numerical simulation resistance values

由图 4 可以看出,仿真值和试验值均是随航速的增加而增加的,二者吻合较好,仿真值只在较高航速时略高于试验值,整体来说误差控制在 2% 以内,验证了本文采用方法的可行性。

2.5 近冰面航行计算模型建立方法验证

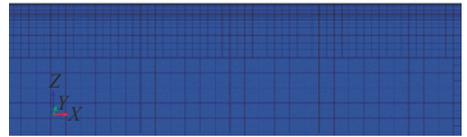
由于基于重叠网格的方法(方法 1),也即采用潜艇在静止的冰面下直线航行的计算模型开展数值计算的方法,存在计算资源耗费大、计算速度过慢及计算结果不易收敛的问题,所以在实际计算中采用的是潜艇在均匀来流中的水动力性能分析方法(方法 2)来模拟艇-冰-流之间的相互作用,由此避免重叠网格的应用,降低计算难度并提高计算速度。这种方法的几何模型及网格划分示意图如图 5 所示。



(a) 整体流域



(b) 艇体加密



(c) 冰面下表面棱柱层网格



(d) 冰面下表面加密区

图5 近冰面航行计算域网格

Fig. 5 Computational domain grid when sailing near ice surface

但是,采用艇不动的方法(方法 2)会消除艇与冰面之间的相对运动。针对这一缺陷,分别提取基于方法 1 和方法 2 这 2 种方法计算得到的潜艇航行阻力、艇体表面压力分布、中纵剖面上半缘线压力系数分布及冰面下表面压力分布结果进行了对比验证,以此确认方法 2 中计算模型设置对计算结果的影响程度。各计算结果的对比如表 5 和图 6、图 7 所示。计算工况选择较高航速 $V=5.29$ m/s(潜艇以较高航速航行时对计算方法的准确性及稳定性要求较高,作为方法 1/方法 2 的对比验证计算工况较为合理)下的不同潜深($d=1.67, 2.08$ m)。观察表 5,发现在不同潜深下,相比于方法 1,方法 2 在潜艇阻力计算结果上的偏差均在 3% 以内。

表 5 $V=5.29$ m/s 时不同潜深下潜艇航行阻力计算结果对比
Table 5 Comparison of computational results of submarine navigation resistance under different submergence depths when $V=5.29$ m/s

潜深/d/m	航行阻力/N		偏差/%
	方法1	方法2	
1.67	278.6	270.3	2.98
2.08	276.9	269.8	2.56

为了更加精确地对比 2 种计算方法对艇体表面压力的影响,提取了各方法下艇体中纵剖面上半缘线的表面压力系数 C_p 分布,如图 6 所示(图中,横坐标为艇不同横向位置的无因次值)。由图可见,基于方法 1 和方法 2 得到的艇体中纵剖面表面压力系数分布基本相同,仅在围壳后端、尾翼、艇艏型线收缩处出现了略大的差异。与方法 1 的计算结果相比,基于方法 2 计算的艇体中纵剖面上半缘线表面压力系数偏差在 1.6% 以内。

图 7 所示为航速 $V=5.29$ m/s、潜深 $d=1.67$ m 时,基于 2 种计算方法得到的冰面下表面压力分布云图。其中,横坐标为艇不同横向位置的无因次值,纵坐标为 2 种计算方法所得到的压力系数的物理值。由图可见,采用 2 种计算方法得到的

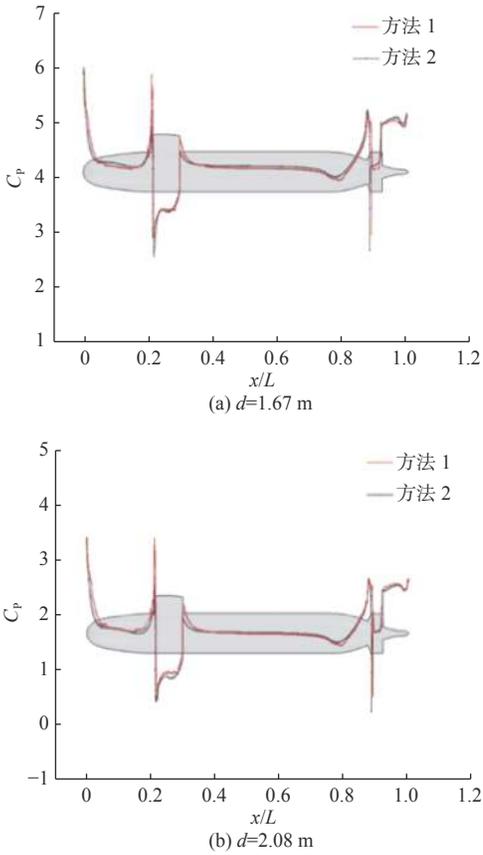


图6 $V=5.29$ m/s 时不同潜深下潜艇中纵剖面上半缘线表面压力系数 C_p 分布对比

Fig. 6 The C_p of the upper submarine mid profile under different submergence depths when $V=5.29$ m/s

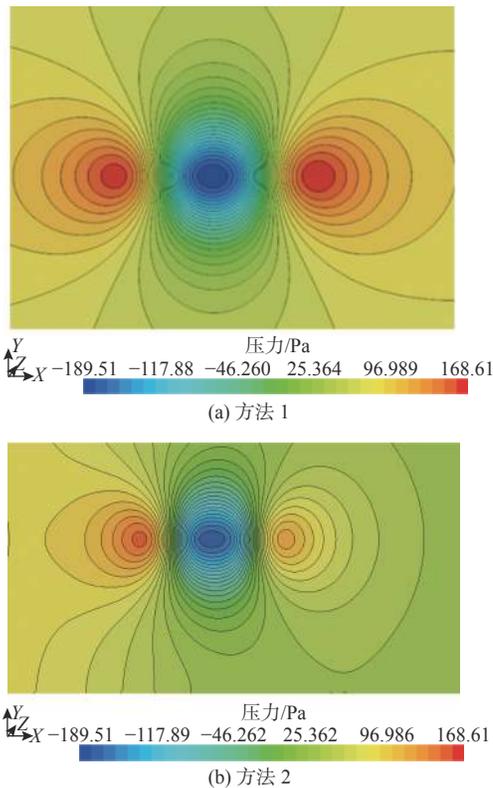


图7 $V=5.29$ m/s, $d=1.67$ m 时方法1/方法2冰面下表面压力分布对比

Fig. 7 Comparison of pressure distribution between method 1 and method 2 at $V=5.29$ m/s, $d=1.67$ m

冰面下表面压力分布形态基本一致,因艇体与冰面之间的水流流速较快,导致冰面在艇体上方出现了环状低压区,并在低压区的前、后方出现了环状高压区,这种压差在一定程度上会导致冰板的形变。对比图7(a)与图7(b)可见,采用方法2模拟潜艇近冰面航行冰面所受到的影响时,计算模型的设计缺陷并未对结果形成较大的干扰。

综上,考虑到采用方法1开展潜艇近冰面航行计算资源耗费较大、计算速度过低,因此在有限的计算资源与时间条件下,本文将选择方法2作为潜艇近冰面航行数值模拟的计算方法。对于方法2在计算模型设置上存在的缺陷,通过对潜艇航行阻力、艇体表面压力系数及冰面下表面压力分布计算结果的对比验证,证明此缺陷对近冰面航行潜艇的阻力、绕流场及冰面下表面压力的数值模拟结果影响较小,不影响方法2的可行性。

2.6 计算工况设置

参考 Pogorelova 等^[15]对潜艇在弹性板下运动的试验研究,数值模拟的工况在实尺度上与该试验中的工况设置一致,如表6所示。表中, Fr 为艇长弗劳德数, d 为 Suboff 潜艇航行深度(艇体中轴线至冰面下表面的距离), D 为艇体最大直径(本文计算模型取 $D=0.508$ m)。

表6 各工况计算参数设置

Table 6 Calculation parameter setting for each working condition

工况序号	Fr	潜深 d /m		d/D
		模型尺度	实尺度	
1	0.44	0.83	20	1.63
2		1.25	30	2.46
3		1.67	40	3.29
4		2.08	50	4.09
5	0.56	0.83	20	1.63
6		1.25	30	2.46
7		1.67	40	3.29
8		2.08	50	4.09
9	0.69	0.83	20	1.63
10		1.25	30	2.46
11		1.67	40	3.29
12		2.08	50	4.09
13	0.81	0.83	20	1.63
14		1.25	30	2.46
15		1.67	40	3.29
16		2.08	50	4.09

3 计算结果与分析

3.1 阻力预报结果分析

各工况下近冰面航行潜艇总阻力(单位: N)计算结果如表 7 所示, 各潜深下艇体的各成分阻力系数随弗劳德数 Fr 的变化规律如图 8 所示。

其中, 摩擦阻力系数 C_F , 压阻力系数 C_{VP} 和总阻力系数 C_T 的定义如下:

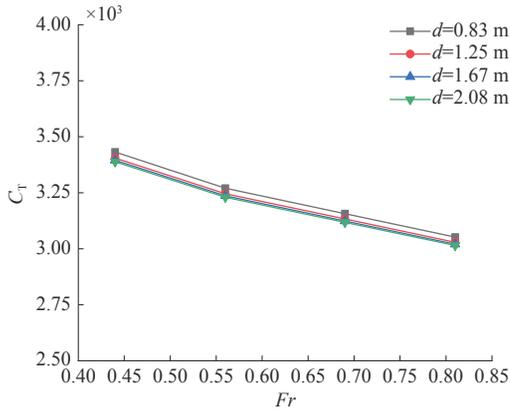
$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, C_{VP} = \frac{R_{PR}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}, C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (5)$$

式中: R_F, R_{PR}, R_T 分别为艇体的摩擦阻力、压阻力和总阻力; $\rho=998.16 \text{ kg/m}^3$, 为水密度; A 为艇体湿表面积, 由于本数值模拟时潜艇是完全浸入水中

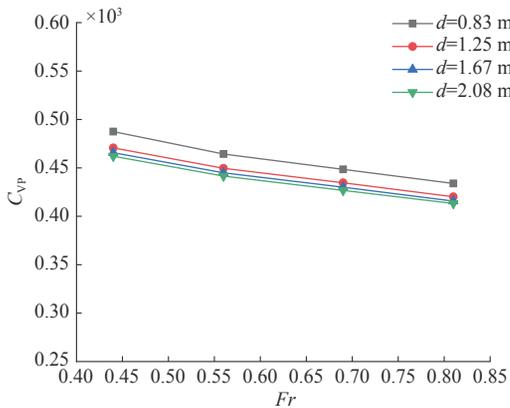
表 7 各工况下近冰面航行 Suboff 潜艇总阻力

Table 7 The total resistance of Suboff model under different working conditions when sailing near the ice surface

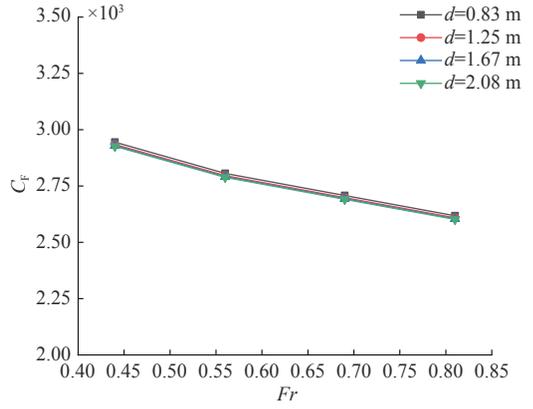
d/D	总阻力/N			
	$Fr=0.44$	$Fr=0.56$	$Fr=0.69$	$Fr=0.81$
1.63	89.11	139.82	201.99	273.16
2.46	88.41	138.77	200.50	271.09
3.29	88.15	138.37	199.91	270.30
4.09	87.97	138.09	199.52	269.84



(a) 总阻力系数



(b) 压阻力系数



(c) 摩擦阻力系数

图 8 不同工况下近冰面航行潜艇各成分阻力系数

Fig. 8 The different composition of drag coefficient of Suboff under different working conditions when sailing near the ice surface

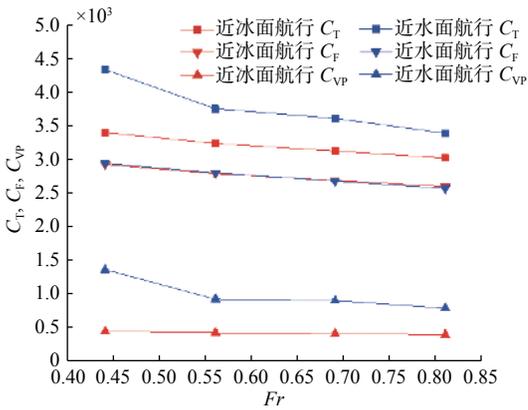
的, 所以 A 为 Suboff 全附体潜艇模型的表面积, $A=6.361 \text{ m}^2$ 。

由图 8(a) 可知, 潜艇的总阻力系数 C_T 在同一弗劳德数 Fr 下随潜深 d 的增加而降低, 在同一潜深 d 下随弗劳德数 Fr 的增加而降低。并且, 在不同潜深下, 艇体阻力系数随航速的变化趋势几乎相同。潜艇近冰面航行时, 总阻力包括摩擦阻力和压阻力。对比图 8(b) 和图 8(c) 中的数值发现, 潜艇近冰面航行时, 在设计工况范围内, 摩擦阻力系数 C_F 占总阻力系数 C_T 的主要部分。通过对潜艇周围阻力性质的分析不难得出, 由于冰面的存在, 使得艇体周围不存在兴波影响, 因而减小了艇体所受到的压阻力; 此外, 由于艇体全部浸没于水中, 且潜艇的湿表面积较大, 故进一步削减了压阻力对总阻力的贡献。摩擦阻力为边界层内剪切应力的合力。由于壁面剪切应力 τ 在湍流态时正比于航速 $V^{3/2}$, 所以壁面剪切应力 τ 随 V 的增大情况小于 V^2 关系, 从而导致了局部摩擦阻力系数 C_F 随航速的升高而降低的情况^[16]。因为 C_T 与 C_F 的变化规律是一致的, 所以, C_F 随航速的升高有降低趋势, 这与图 8(c) 中 C_F 随 Fr 的变化趋势是一致的。在各个潜深下, 4 条曲线几乎重合, 这说明在潜艇近冰面航行情况下, 潜深对 C_F 的影响很小, 这一结论在文献 [15] 中得到了印证。

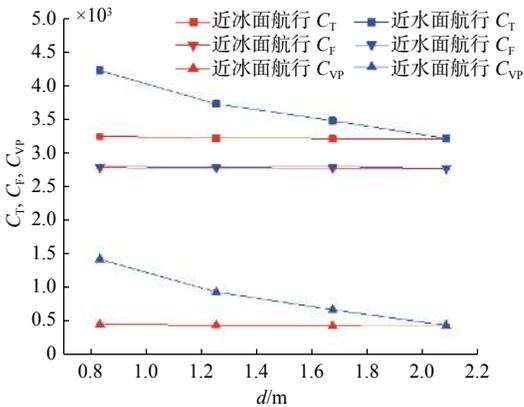
观察图 8(b) 并与摩擦阻力系数 C_F 相比, 发现压阻力系数 C_{VP} 随潜深的变化较大。随着艇体逐渐远离冰面, C_{VP} 将逐渐降低, 但随着潜深的增大, 压阻力系数 C_{VP} 的变化趋势逐渐减小。具体体现为, 当潜深 $d=1.25, 1.67$ 和 2.08 m ($d/D=2.46, 3.29, 4.09$) 时, 所得到的艇体 C_{VP} 值几乎没有变化, 不过在最小潜深 $d=0.83 \text{ m}$ ($d/D=1.63$) 时 C_{VP} 的变化相对较大。所以, 在近冰面航行时, 当 $d/D>1.63$

时,潜深几乎不影响艇体的阻力系数。

图9提取了 $d=1.25$ m时近冰/水面航行时各成分阻力系数随 Fr 变化的曲线,以及 $Fr=0.56$ 时近冰/水面航行时各成分阻力系数随 d 变化的曲线。由图可见,与近水面边界条件相比,近冰面航行时的总阻力系数 C_T 普遍偏小;各工况下近水/冰面航行艇体的摩擦阻力系数 C_F 基本一致,近水/冰面航行时潜艇总阻力系数 C_T 的差异主要体现在压阻力系数 C_{VP} 随 Fr 及潜深 d 的变化形式上。观察图9还可以发现,近冰面航行时,由于没有表面兴波对兴波阻力的影响,压阻力普遍小于近水面航行时的情况;在近水/冰面航行摩擦阻力系数基本相同的条件下,导致近冰面航行时艇体总阻力系数 C_T 普遍偏小;此外,近冰面航行时 Fr 对 C_T 影响的线性程度较大。



(a) 不同阻力成分与弗劳德数的关系 ($d=1.25$ m)



(b) 不同阻力成分与潜深的关系 ($Fr=0.56$)

图9 各工况下潜艇近冰/水面航行时不同成分阻力系数的对比
Fig. 9 The different composition of drag coefficient of Suboff under different working conditions when sailing near the ice/water surface

3.2 壁面压力/摩擦系数分析

3.2.1 监测位置及数值处理方法

表面压力系数 C_p 和表面摩擦阻力系数 C_f 的定义如下:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2}, C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (6)$$

式中, P 为表面压力。

本小节所选取的Suboff潜艇艇体中纵剖面上缘线以及指挥室围壳和尾翼的不同截线位置如图10所示。图中, H_1 为指挥室围壳截线与艇体之间的距离, H_2 为截线前端距离尾翼与艇体交线前缘点的距离; S 为尾翼截面总高度。

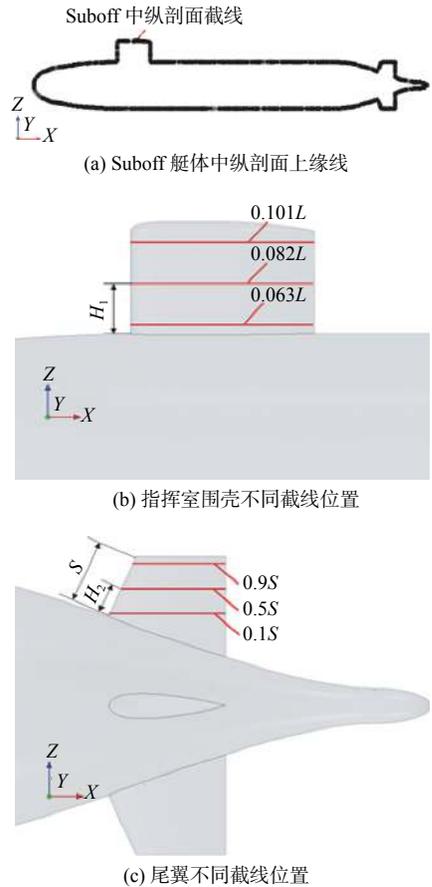


图10 潜艇相对应的截线位置

Fig. 10 The transverse position of a submarine

3.2.2 中纵剖面上半缘线压力系数及摩擦系数对比

图11所示为近冰面航行状态下, $Fr=0.56$ 时各潜深下的艇体中纵剖面上缘线表面压力系数分布曲线。图12所示为 $d=1.25$ m时各弗劳德数下的艇体中纵剖面上缘线表面压力系数分布曲线。

由图11(a)可知,在各潜深下, C_p 沿艇体分布的规律几乎相同,其随着潜深的均匀增加也呈均匀增加趋势。形成这一现象的原因主要是流体静压随潜深的线性变化,同时,由于冰面的存在,不存在兴波现象对艇体表面压力分布规律的影响。由图12(a)可知,潜艇以不同的航速航行时, C_p 沿艇体分布的形式基本相同;随着弗劳德数的增加, C_p 会有所下降,这与式(5)一致。而无论潜深

和弗劳德数如何改变,艇体周围的摩擦阻力系数并不会产生较大的波动。因此,在考虑潜艇近冰面航行的表面压力系数时,应充分考虑航行速度和流体静压的影响。

此外,从图11和图12中还可以看出,在艇体型线变化剧烈的位置,其附近的表面压力系数 C_p 及摩擦阻力系数 C_f 变化较大,这主要体现在模型艏部,以及指挥室围壳前、后缘和尾翼的前缘。但从整体上来看, C_p 和 C_f 在围壳处变化最大。

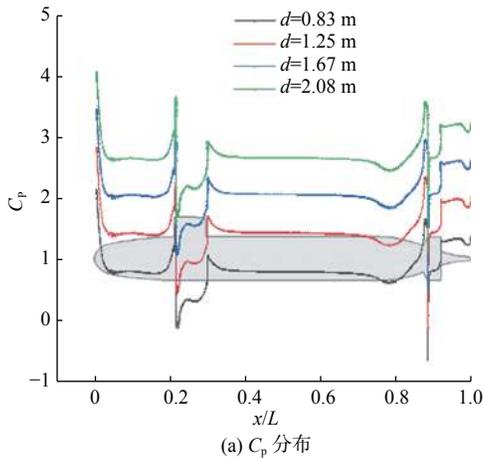
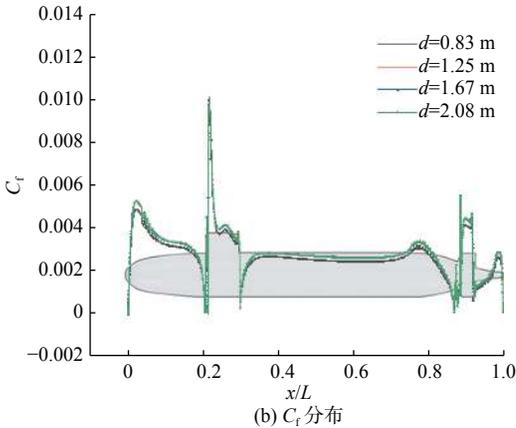
(a) C_p 分布(b) C_f 分布

图11 近冰面航行时各潜深下艇体中纵剖面上缘线 C_p 和 C_f 的分布($Fr=0.56$)

Fig. 11 The C_p and C_f distribution of upper submarine mid profile under different submergence depths when sailing near the ice surface ($Fr=0.56$)

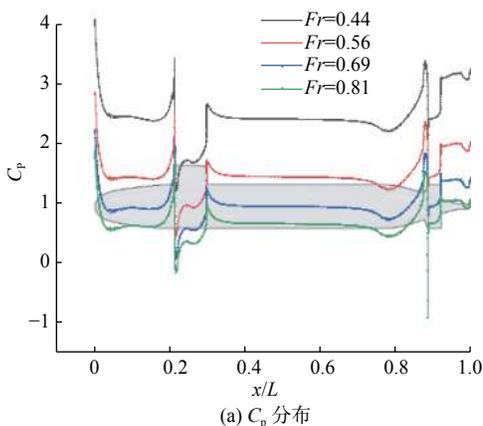
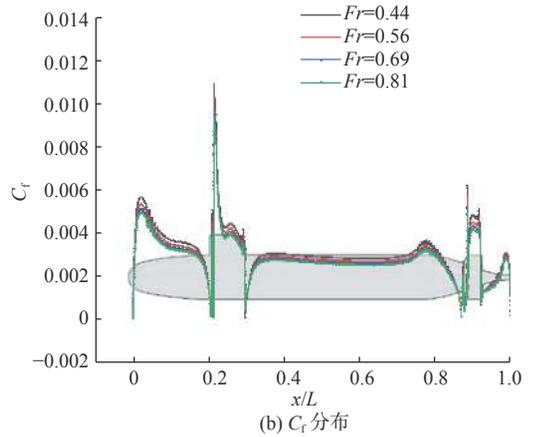
(a) C_p 分布(b) C_f 分布

图12 近冰面航行时各弗劳德数下艇体中纵剖面上缘线 C_p 和 C_f 的分布($d=1.25$ m)

Fig. 12 The C_p and C_f distribution of upper submarine mid profile for different Froude numbers when sailing near the ice surface ($d=1.25$ m)

具体而言,Suboff潜艇模型艏部、指挥室围壳前、后部以及尾翼附近的摩擦阻力较高,说明这几个区域的流速变化较大,因此在潜艇执行作业任务时需特别予以考虑。综合来看,在设计工况内,潜深及弗劳德数对 C_f 的影响较小,其随着弗劳德数的降低略有升高。

3.2.3 围壳及尾翼表面压力和摩擦阻力系数分析

近冰面航行时,指挥室围壳不同高度截线处表面压力系数分布沿截面弦长分布变化的规律如图13和图14所示。

考虑到截面具有对称性且在均匀来流中作直航运动,因此图13和图14只给出了截面一侧的压力分布,尾翼的情况亦是如此。为了形象说明各高度截线上各监测点在围壳、尾翼表面的位置,取了围壳、尾翼的横截面作为 C_p 分布曲线的背景。从图中可以看出,不同指挥室围壳在不同高度处截面的压力分布形式类似, C_p 在前部和艉部出现了极大值,而在围壳中间区域由于型线形状变化出现了轻微波动,在型线过渡处出现了极小值。总体上,尾翼处型线的变化会使围壳中部附近的流体流速相对较快,压力相对较小。

由图13可见, C_p 的分布规律基本一致,在各弗劳德数 Fr 下是随潜深的增加而均匀增加的; C_p 在同一工况下随截线高度的上升有微小的下降。由图14可见,在围壳表面,航速对 C_p 的影响普遍呈一定程度的负相关;此外,在较高位置的围壳截线处,因 Fr 导致的 C_p 值差异变小。这说明相对于围壳顶部,航速对围壳底部与艇体连接处的影响更大,故在考虑潜艇安全性设计时应着重予以考虑。

尾翼在不同高度截线处的表面压力系数变化如图15和图16所示(图中, L_0 为尾翼弦长的总长

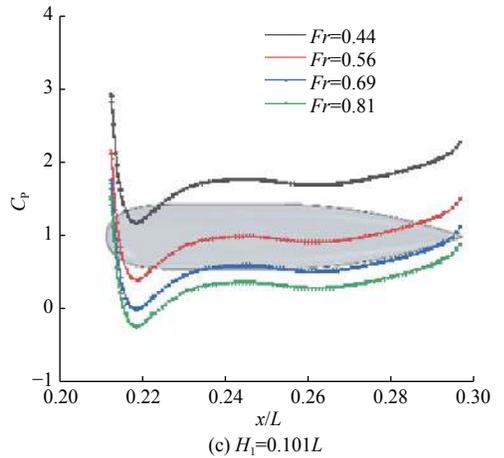
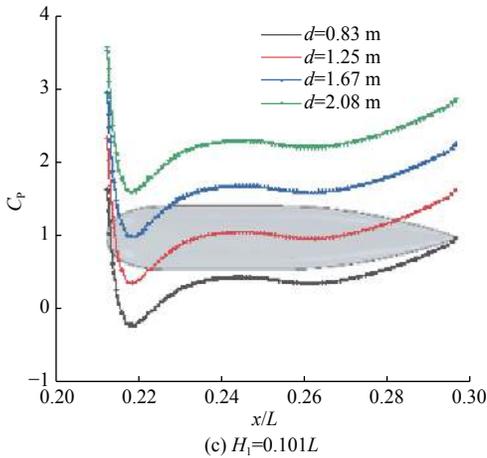
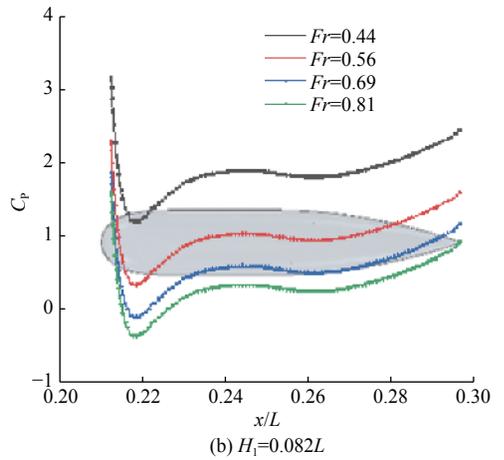
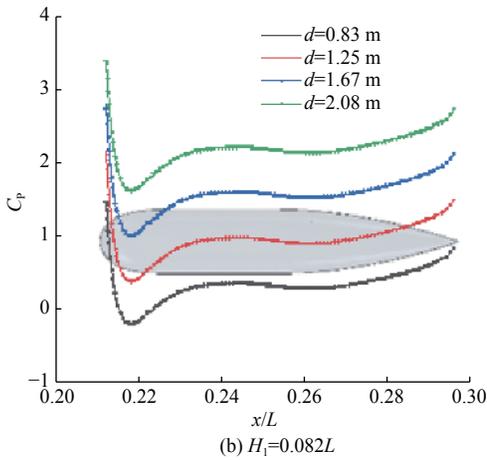
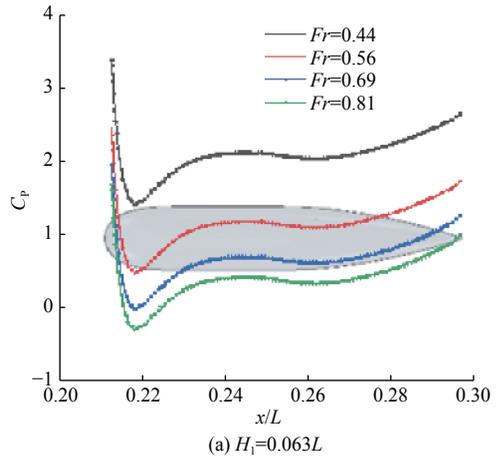
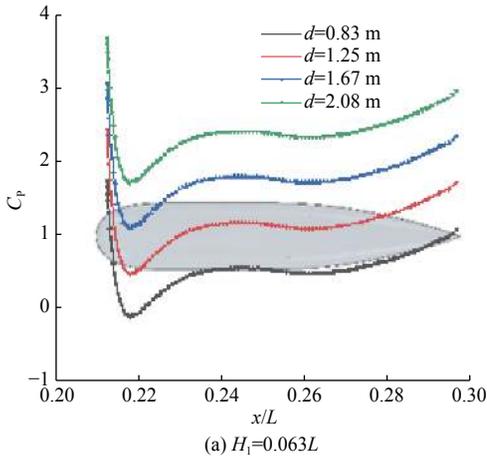


图 13 近冰面航行时各潜深下指挥室围壳不同高度截线的 C_p 分布对比 ($Fr=0.56$)

Fig. 13 The C_p distribution of sail transversals at different heights for different submergence depths when sailing near the ice surface ($Fr=0.56$)

度, x_0 为尾翼不同位置 x 方向位置的分布)。与指挥室围壳压力分布形式不同, 由于潜艇艏部流场较为紊乱, 所以表面压力系数在尾翼各高度截线上的分布曲线其平滑程度较低。整体而言, 尾翼前部与后部压力较大而中部压力较小, 这一点与指挥室围壳的情形相似, 因二者的横截面均为机翼型对称剖面。与艇艏部流场相比, 艇艏部流场并非同艏部一样为增速减压区, 这为边界层的分

图 14 近冰面航行时各弗劳德数下指挥室围壳不同高度截线的 C_p 分布对比 ($d=1.25$ m)

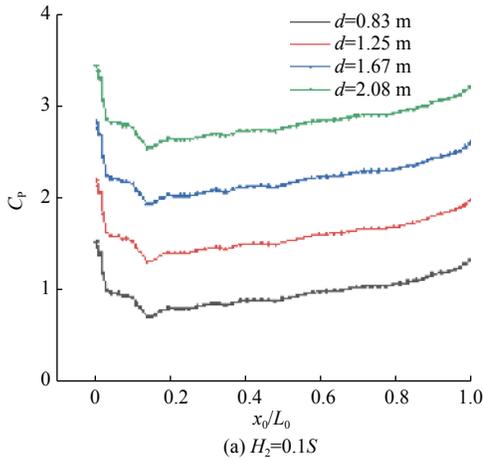
Fig. 14 The C_p distribution of sail transversals at different heights for different Froude numbers when sailing near the ice surface ($d=1.25$ m)

离提供了条件, 使得尾翼剖面上的压力分布变化更为剧烈。该剧烈程度不是从最大值与最小值之差看出, 而是从压力分布的脉动剧烈程度看出。

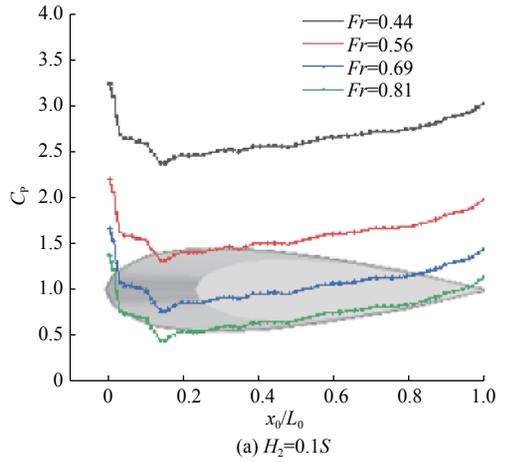
3.3 潜艇近冰面绕流场分析

3.3.1 潜艇中纵剖面速度场分析

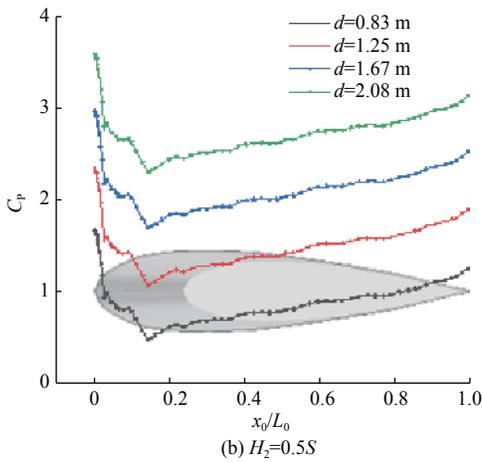
为了直观地说明各参数对艇体周围绕流场的影响, 提取了 $Fr=0.56$ 时各潜深下的艇体中纵剖



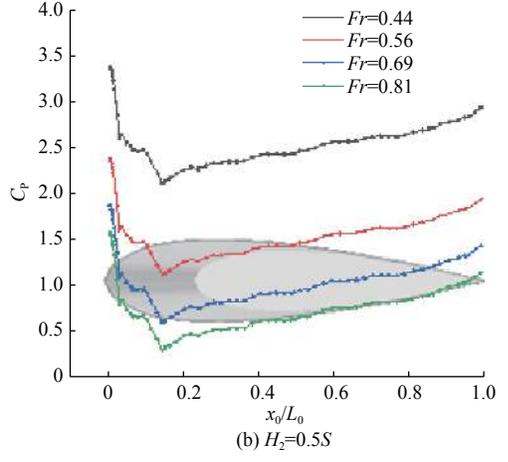
(a) $H_2=0.1S$



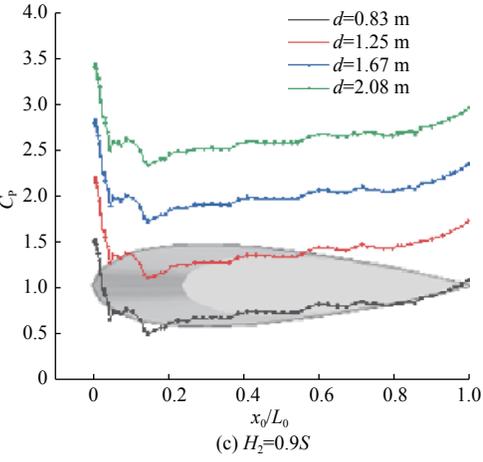
(a) $H_2=0.1S$



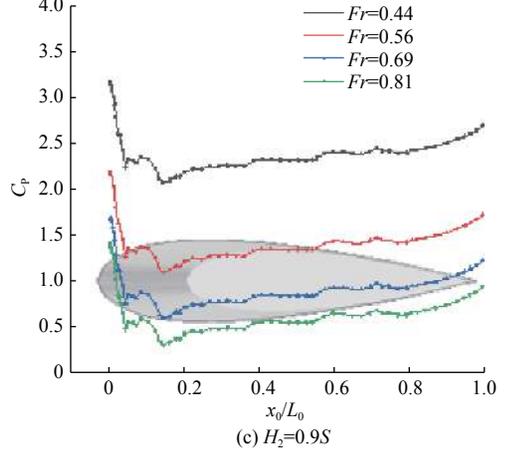
(b) $H_2=0.5S$



(b) $H_2=0.5S$



(c) $H_2=0.9S$



(c) $H_2=0.9S$

图 15 近冰面航行时各潜深下尾翼不同高度截线处 C_p 分布对比 ($Fr=0.56$)

Fig. 15 The C_p distribution of trail transversals at different heights for different submergence depths when sailing near the ice surface ($Fr=0.56$)

图 16 近冰面航行时各弗劳德数下尾翼不同高度截线处 C_p 分布对比 ($d=1.25$ m)

Fig. 16 The distribution of C_p of trail transversals at different heights for different Froude numbers when sailing near the ice surface ($d=1.25$ m)

面速度场, 以及 $d=1.25$ m 时各弗劳德数下的艇体中纵剖面速度场, 如图 17 和图 18 所示。由图 17 和图 18 可以发现, 在艇艏前方、围壳后方以及尾翼后方形成了低速高压区, 这与潜艇的压阻力密切相关。艇艏前方的流动主要由艇艏驻点控制, 由艇艏前端向艏肩处形成顺压梯度, 这使得边界层向艏肩处方向逐渐变厚, 从而影响艇体的压阻力。指挥室围壳及尾翼处边界层的分离在船体后

面产生了复杂的尾流, 包括围壳后方的马蹄涡, 并在该区域形成了高压区^[7]。艇体绕流场的复杂程度沿垂向向上逐渐降低, 在围壳周围流场, 层次最为丰富。

指挥室围壳周围流场复杂的原因是围壳后缘收缩的型线形状, 其导致了逆压梯度的形成, 为边界层的分离提供了必要条件。而边界层的分离会使背流面的流场变得更加复杂, 从而形成一片

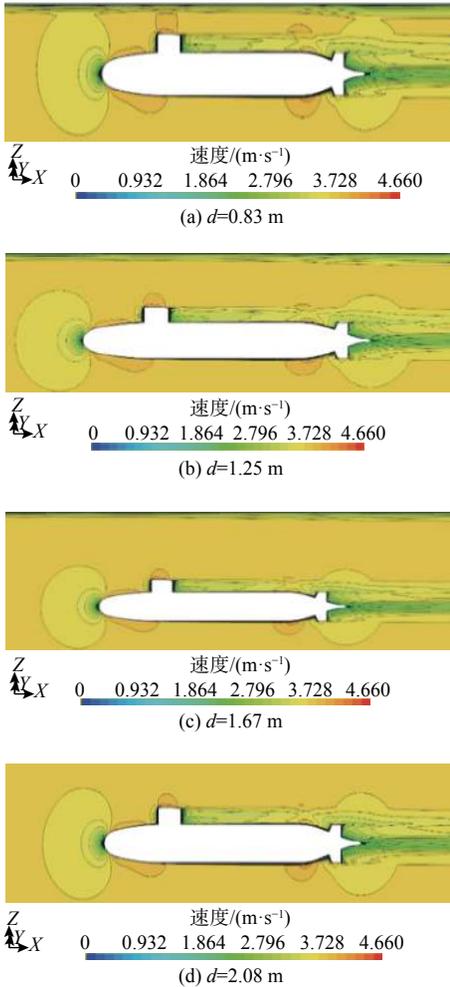


图 17 近冰面航行时各潜深下艇体中纵剖面速度场 ($Fr=0.56$)
Fig. 17 The velocity distribution of upper submarine mid profile at different submergence depths when sailing near the ice surface ($Fr=0.56$)

混乱的尾迹。这也就解释了图 17 和图 18 所示速度云图中, 潜艇指挥室围壳后缘流速较低且流场较为紊乱的原因。

由图 17 可以发现, 在同一弗劳德数 ($Fr=0.56$) 下, 艇体近冰面航行 ($d=0.83$ m, 即 $d/D=1.63$) 时艇周的速度等值线被冰面阻断了。结合图 8(b) 可以看出, 在 $Fr=0.56$ 时的各个潜深工况中, $d=0.83$ m (即 $d/D=1.63$) 时 C_{VP} 略高, 在其他 3 个较大潜深条件下所得到的 C_{VP} 几乎相同。这说明潜艇近冰面航行时, 在过小潜深 ($d=0.83$ m, $d/D=1.63$) 下, 冰面对艇体周围中纵剖面速度场的干扰会使得潜艇的压阻力系数增大。并且在同一弗劳德数下, 当 $d/D>1.63$ 时, 潜深对艇体绕流场的影响可以忽略。

对比图 18(a)~图 18(d) 可以发现, 弗劳德数对艇体和冰面的相互作用影响显著。当 $Fr=0.44\sim 0.81$ 时, 由艇体至冰面之间可以观察到明显的由前向后的低、高、低速区, 根据伯努利原理, 若潜艇近水面航行, 相应位置的液面就会因此出现高、低、

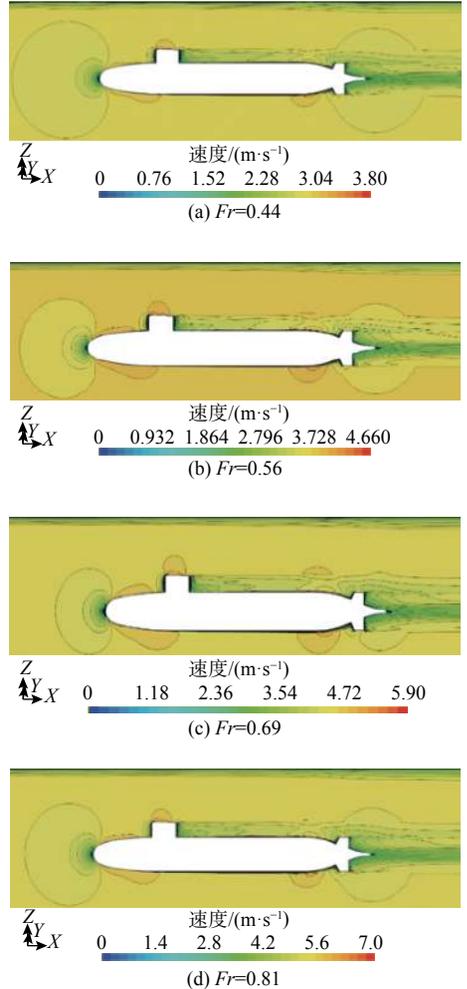


图 18 近冰面航行各弗劳德数下艇体中纵剖面速度场 ($d=1.25$ m)
Fig. 18 The velocity distribution of upper submarine mid profile for different Froude numbers when sailing near the ice surface ($d=1.25$ m)

高的变化, 形成明显的波形。而在潜深足够及不存在等值线被冰面阻断的情况下, 随着弗劳德数的变化, 艇体周围的速度场并不会发生如之前改变潜深时比较明显的变化。由此可以大胆推测, 当潜深足够时, 航速的增加不会对艇体中纵剖面的速度场分布形态造成影响。

3.3.2 潜艇中纵剖面涡量场分析

由艇体周围的涡量轮廓图和桨盘面处的涡量等值线, 可以补充上述航速、潜深对艇体绕流场的理解。涡量为速度的旋度, 图 19~图 20 较好地描述了艇体附近的涡量分布。由于在指挥室围壳后方和尾翼后方出现了边界分离, 因而易形成涡, 且涡量分布较为密集, 这与文献 [17-18] 中得到的各轴向站位涡量分布规律相符。通过对比图 19 和图 20 可以发现, 潜深对艇艏处涡量等值区域范围的影响较大, 而艇体航行速度对艇艏涡量等值区域等值线密集度及涡量大小的影响较大。当 $Fr=0.56$, $d=2.08$ m 时, 各轴向站位的涡量分布集中在艇体较小的区域, 说明在同一弗劳德

数($Fr=0.56$)下,冰面对围壳、尾翼后方的旋涡形成有较大影响。而在同一航行深度($d=1.25$ m)下, $Fr=0.81$ 时所得到的涡量分布图在旋涡分布面积几乎相同的前提下,在每个站位涡量分布图内的等值线都更为密集,涡量的值也较大,这说明高航速下速度的旋度会相应增大,从而加速边界层分离,使艇体的粘压阻力增大。

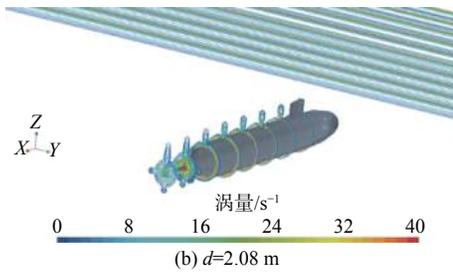
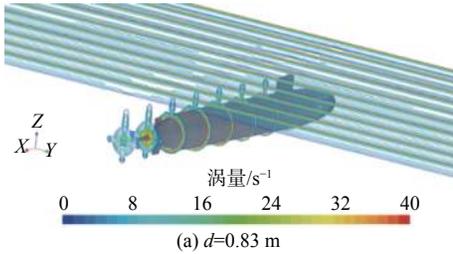


图 19 $Fr=0.56$ 时高、低潜深下艇体各轴向站位涡量轮廓图
Fig. 19 The vorticity distribution at different axial positions under high/low submergence depth when $Fr=0.56$

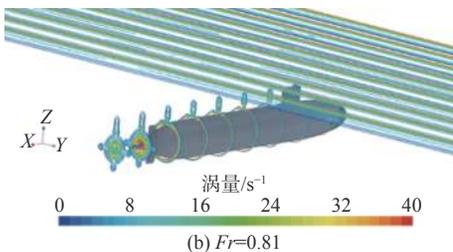
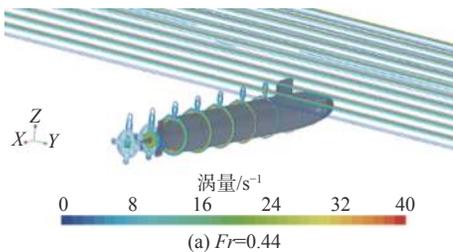


图 20 $d=1.25$ m 时各弗劳德数下的艇体各轴向站位涡量轮廓图
Fig. 20 The vorticity distribution at different axial positions for different Froude numbers when $d=1.25$ m

此外,由图 19 和图 20 还可以发现,在 Suboff 潜艇模型近冰面航行情况下,由于对冰面下表面所设的无滑移壁面边界条件,在壁面粘滞力的作用下,在截取艇体轴向各站位的涡量轮廓图时发现冰面下方涡量场的分布较规则;在各工况下,近冰面的涡量场对艇周涡量场未体现出干扰。

4 结 论

为了探究冰面作为边界条件对潜艇航行阻力性能、表面压力系数及绕流场的影响,本文以 Suboff 全附体潜艇模型为研究对象,建立了近冰面航行模型,系统计算并分析了潜深和弗劳德数对近冰面航行的阻力和流场特性的影响,主要得出以下结论:

1) 潜艇近冰面航行时,潜艇的总阻力系数 C_T 在同一弗劳德数下随潜深的增加而减小,在同一潜深下随弗劳德数的增加而减小。艇体的摩擦阻力系数 C_F 占据了总阻力系数 C_T 的较大部分,压阻力系数 C_{VP} 为次要成分。

2) 艇体近冰面航行时,在同一弗劳德数下,当 $d/D > 1.63$ 时,潜深几乎不影响艇体阻力系数。此外,由于没有表面兴波对压阻力的影响,近冰面航行时弗劳德数对总阻力系数的影响较为规律。

3) 艇体在冰面下航行时,在指挥室围壳后缘以及尾翼后缘出现了边界层分离,表面压力系数 C_p 变化较大。在同一弗劳德数下,各潜深下的 C_p 沿艇体分布的规律几乎相同。随着潜深的均匀增加, C_p 也呈均匀增加的趋势。在同一潜深下,随着弗劳德数的增加, C_p 呈指数型下降。

4) 潜艇在近冰面航行时,由于艇体型线的收缩,产生了逆压梯度,从而为边界层分离提供了必要条件,使得围壳后方各站位轴向涡量轮廓等值线更为密集,潜艇近冰面航行时在围壳后缘附近产生的流场沿 Z 轴正方向的复杂程度较大。并且,计算工况内的弗劳德数对艇体中纵剖面绕流速度场的分布均影响微弱; $d/D > 1.63$ 时,潜深对艇体绕流场的影响可以忽略。

参考文献:

- [1] 徐世昌. 潜艇运动产生的内波与潜艇尾迹的 SAR 遥感仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
XU S C. Internal wave produced by moving submarine and simulation of SAR remote sensing of its wake [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006 (in Chinese).
- [2] 叶礼裕, 王超, 郭春雨, 等. 潜艇破冰上浮近场动力学模型 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 51–59.
YEL Y, WANG C, GUO C Y, et al. Peridynamic model for submarine surfacing through ice [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 51–59 (in Chinese).
- [3] 卢云涛. 全附体潜艇的流场和流噪声的数值研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

- LU Y T. Numerical simulation of the flow-field and flow-noise of fully appendage submarine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008 (in Chinese).
- [4] GROVES N C, HUANG T T, CHANG M S. Geometric characteristics of DARPA Suboff models[R]. Bethesda, MD, USA: David Taylor Research Center, 1989.
- [5] JAGADEESH P, MURALI K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2010, 4(2): 301–313.
- [6] SAOUT O, ANANTHAKRISHNAN P. Hydrodynamic and dynamic analysis to determine the directional stability of an underwater vehicle near a free surface[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(2): 158–167.
- [7] DAWSON E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near surface operation of conventional submarines[D]. Australia: University of Tasmania, 2014.
- [8] 李艳, 姚震球. 带附体潜艇尾流场的数值模拟与验证[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 20(2): 7–12.
LI Y, YAO Z Q. Numerical simulation and validation of wake field of submarine with stern appendage[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 20(2): 7–12 (in Chinese).
- [9] 张楠, 沈泓萃, 姚惠之. 潜艇近海底与近水面绕流数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2007, 11(4): 498–507.
ZHANG N, SHEN H C, YAO H Z. Numerical simulation of flow around submarine operating close to the bottom or near surface[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(4): 498–507 (in Chinese).
- [10] 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(A辑)*, 2012, 27(1): 94–99.
ZHANG N, ZHANG S L, SHEN H C, et al. Numerical simulation of hull/propeller interaction with free surface[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 2012, 27(1): 94–99 (in Chinese).
- [11] 邱云明, 邓锐. 潜艇近水面航行兴波特征研究[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(23): 44–47.
QIU Y M, DENG R. Investigation on the characteristics of the wave induced by a near free surface submarine[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(23): 44–47 (in Chinese).
- [12] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3): 227–238.
- [13] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598–1605.
- [14] LIU H, HUANG T T. Summary of DARPA Suboff experimental program data[R]. Bethesda, MD, USA: Naval Surface Warfare Center, Carderock Division (NSWCCD), 1999.
- [15] POGORELOVA A V, KOZIN V M, ZEMLYAK V L. Motion of a slender body in a fluid under a floating plate[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2012, 53(1): 27–37.
- [16] 杨培青. 近水面航行的潜艇阻力数值模拟[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2007.
YANG P Q. Numerical simulation of resistance of submarine moving near to free-water surface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2007 (in Chinese).
- [17] 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.
- [18] 李士强, 肖昌润, 曹植珺. 基于 STAR-CCM+的潜艇尾流场及水动力数值分析[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(增刊1): 29–35.
LI S Q, XIAO C R, CAO Z J. Numerical analysis of wake flow and hydrodynamics for a submarine based on STAR-CCM+[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(Supp 1): 29–35 (in Chinese).