

DOI: 10.12264/JFSC2021-0160

倾斜状态对 V 形网板水动力和周围流场特征的影响

刘景彬¹, 唐浩^{1, 2, 3, 4, 5}, 许柳雄^{1, 2, 3, 4, 5}, 刘志强¹, 邹柏强¹, 初文华¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 农业部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
5. 农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306

摘要: 为了探究 V 形网板在各种工作姿态下水动力特性的变化规律, 作者采用数值模拟(computational fluid dynamics, CFD)方法对比了 4 个展弦比(0.4、0.5、0.6、0.7)和 4 个板面夹角(16°、19°、22°、25°)的网板的水动力性能, 遴选出水动力性能最佳的 V 形网板, 并分析其不同姿态下, 前后倾和内外倾分别为 5°、10°、15°、20°时的水动力系数、周围流场分布和表面压力变化规律, 结果表明: (1)展弦比 $\lambda=0.7$ 、板面夹角 $\Gamma=16^\circ$ 的 V 形网板(13 号网板)的水动力性能最优, 升力系数在冲角为 37.5°时最大, 为 1.482, 冲角为 10°时扩张效率最大。(2)随着冲角的增大, 13 号网板迎流面的压力逐渐增大, 网板迎流面和背流面的速度差亦呈增大趋势。(3)13 号网板发生不同程度的前后倾或内外倾时, 升力系数降低, 阻力系数则随着倾角的增大而减小。(4)当网板发生内外倾斜时, 随着倾角的增加, 迎流面压力中心向网板前端移动, 网板中心面后涡旋变化不明显; 当网板前后倾斜时, 网板迎流面压力分布变化明显, 即随着倾角的增加, 压力中心分别逐渐向前端上下两侧移动, 并且网板中心面后涡旋逐渐变小。本研究结果可以为预测不同工作姿态网板水动力特性变化, 调整网板稳定性提供科学参考。

关键词: V 形网板; 稳定性; 压力分布; 流场分布; 水动力系数

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)05-0755-15

网板是单船拖网系统中实现网口水平扩张的重要构件, 其水动力性能影响其捕捞作业效率和经济效益^[1]。网板在作业过程中始终保持稳定曳行是决定其发挥或实现预期水动力性能的前提, 而网板的稳定性除了受拖网系统水动力以及实际作业工况的影响外, 还与网板的结构和类型有关。在单船底层拖网作业过程中, 为了确保捕捞效率, 一般要求网板贴底曳行。由于网板与海底的作用或渔船操作变化等原因, 会造成网板在工作过程中发生倾斜(内、外或前、后倾斜)甚至倒伏, 无法保持最佳的工作姿态, 难以提供预期的

扩张力来维持拖网网口的有效扩张, 进而影响了捕捞作业效率^[2-3]。因此, 开展网板的动稳性研究, 了解影响网板稳定性的因素, 对于提高单船底拖网捕捞效率十分必要, 也是网板水动力研究的一个重点。

网板在受到扰动作用后偏离原本的平衡状态产生不同的姿态, 在扰动消失后, 经过一段时间的过度仍能恢复原本的平衡状态, 网板的这种能力就是网板的稳定性。力矩系数常用来描述网板的稳定性。网板在作业过程中受到拖网系统和工况的影响, 产生不同的力矩使得网板呈现各异的

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31902426, 31972845); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(19YF1419800); 农业农村部南极海洋生物资源开发利用项目(D8002-17-0109).

作者简介: 刘景彬(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事于渔具渔法的研究. E-mail: 18340803167@163.com

通信作者: 唐浩, 博士. E-mail: htang@shou.edu.cn

工作状态,进而会影响网板的稳定性及扩张效果。20世纪60年代,英国研究人员将矩形网板改造成矩形曲面网板,并且将网板底角改成圆角,并在网板下沿处增加拖铁装置,实现降低重心,使网板性能有了一定提升,但存在翻倒后不能自动复原的问题;随后,日本学者改进了立式曲面网板,通过优化板面角和后退角,使网板的稳定性有了一定程度的提高^[4-5]。2013年刘健等^[6]通过水槽试验探究了不同倾角下立式曲面网板的最佳工作状态,发现横倾角从 -10° ~ 10° 变化,纵倾角从 -10° ~ 10° 变化时,水动力性能均低于无倾角状态,且网板稳定性良好。2015年Balash等^[7]设计了一种帆型网板,并测得在冲角 $\alpha=20^{\circ}$ 、升阻比为3.3时扩张效果和稳定性最佳。随着计算机技术的发展,运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法研究网板水动力性能,大大提高了研究效率^[8]。2017年刘宏伟等^[9]利用CFD数值模拟的方法,对比了展弦比分别为1.5和2.0的矩形曲面网板的力学性能,选用力矩系数来衡量网板的稳定性。在 0° ~ 50° 冲角的条件下,发现展弦比越大,临界冲角和升力系数越小,最大升阻比越大,而俯仰力矩系数由0.001变为0.013,表明网板的稳定性降低。2020年刘志强等^[2]对不同工作姿态下的立式双曲面网板的水动力性能进行了研究,采用网板力矩系数和压力中心系数表征网板的稳定性,发现网板在冲角为 25° 、倾角为 0° 时,升力系数最高(1.88),并将网板周围流场和表面压力可视化,直观的展现了网板表面压力中心的偏移,从流场和受力上解释了网板动稳性的原理。2021年许庆昌等^[10]采用响应面法对矩形曲面网板进行了参数优化,结果表明,响应面法优

选出的网板,当网板在工作冲角受到碰撞时,最初的和最佳的网板的压力中心值是相近的,且垂直压力中心相对稳定。Xu等^[11]研究V形网板水动力性能时,对比了Fluent和CFX两种求解方法与水槽模型试验结果之间的差异。CFX具有网格划分精度高、求解精度高等优点,适合用来模拟网板受力,预测网板的升力系数、升阻比准确性高;而Fluent更适合模拟速度场。

V形网板在单船底层拖网中广泛应用,具有良好的稳定性以及越障能力。上述研究主要聚焦网板的升阻力系数在不同结构参数下的变化规律,但忽视了网板发生倾斜时其水动力及周围流场特性的变化。为此,本研究利用CFD数值模拟的方法对不同展弦比、板面夹角的V形网板水动力性能进行了研究分析,并分析不同姿态下网板水动力和流场分布、压力分布特征变化规律,为V形网板的结构参数优化以及动稳性研究提供基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 网板结构参数

网板外形结构参考自李崇聪^[12]硕士的毕业论文(图1),在原型网板的基础上对网板结构参数做出改变(表1),其中 Γ 为板面夹角, L 为翼展, C 为翼弦, S 为网板面积, α 为冲角,展弦比 $\lambda=L/C$ 。模型尺度比为1:2,网板厚度为10 mm。展弦比分别设置为0.4、0.5、0.6和0.7,板面夹角为 16° 、 19° 、 22° 和 25° 。水流速度为0.6 m/s,网板冲角为 10° ~ 50° 。Xu等^[11]研究结果显示该网板临界冲角约为 40° ,故将冲角设置 10° ~ 35° 和 45° ~ 50° 间隔为 5° , 35° ~ 45° 间隔为 2.5° 。

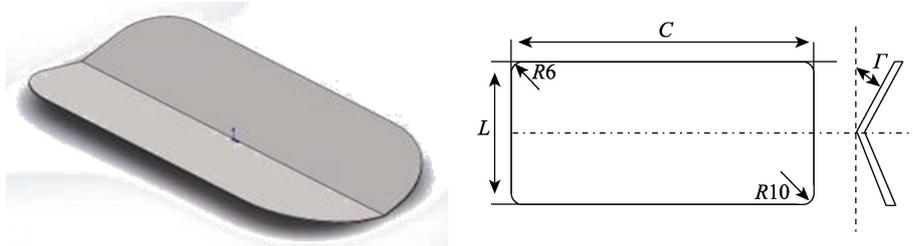


图1 网板模型及结构参数

Fig. 1 Otter board model and its structure parameters

表 1 网板模型结构参数
Tab. 1 Structure parameters of otter board models

网板编号 otter board number	展弦比 λ aspect ratio: λ	板面夹 角 Γ dihedral angle: Γ	翼展 L/m wing span: L	翼弦 C/m chord: C	面积 S/m^2 area: S
1	0.4	16°	0.31	0.77	0.24
2	0.4	19°	0.31	0.77	0.24
3	0.4	22°	0.31	0.77	0.24
4	0.4	25°	0.31	0.77	0.24
5	0.5	16°	0.35	0.69	0.24
6	0.5	19°	0.35	0.69	0.24
7	0.5	22°	0.35	0.69	0.24
8	0.5	25°	0.35	0.69	0.24
9	0.6	16°	0.38	0.63	0.24
10	0.6	19°	0.38	0.63	0.24
11	0.6	22°	0.38	0.63	0.24
12	0.6	25°	0.38	0.63	0.24
13	0.7	16°	0.41	0.59	0.24
14	0.7	19°	0.41	0.59	0.24
15	0.7	22°	0.41	0.59	0.24
16	0.7	25°	0.41	0.59	0.24

1.2 数值模拟

数值模拟采用 ANSYS 19.2 软件, 并在 WORKBENCH 中完成数值计算^[13]。数值水槽尺寸的确定主要需考虑以下方面: 首先水槽的尺寸要尽可能的缩小, 以减少模拟过程中的巨大运算量; 此外, 要考虑水槽壁面的边界效应对网板周

围流态的影响^[11-14]。为了更好的观察网板的尾流区部分, 本研究网板模型相对水槽的位置选择进出口比例为 1 : 2 构建水槽模型。数值水槽长 3 m, 宽 1.2 m, 高 1 m, 网板中心轴距水流入口 1 m, 网板中心轴距两侧壁面 0.6 m (图 2)。

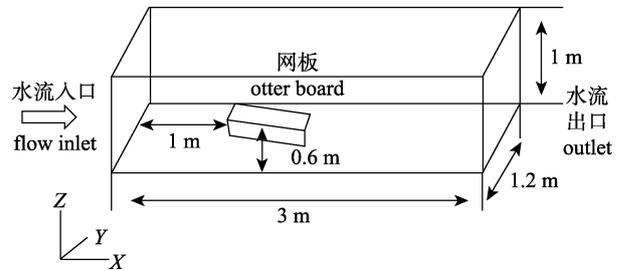
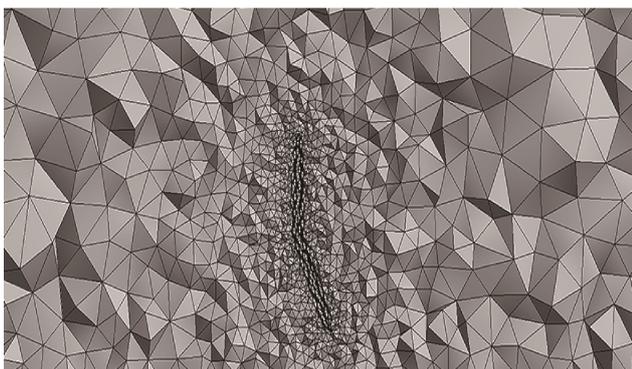


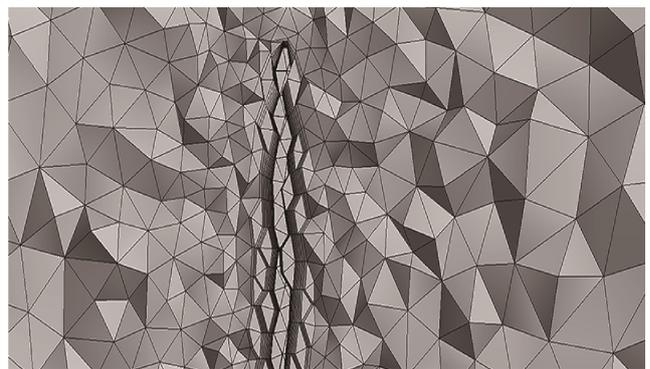
图 2 模拟计算区域
Fig. 2 Domain of simulation calculation

数值水槽和网板周围网格全部划分为四面体网格。网板网格尺寸为 2.5 mm, 数值水槽区域网格尺寸为 15 mm (图 3)。网板表面膨胀层第一层厚度为 1×10^{-1} mm ($y^+ \approx 15$), 膨胀层数设置为 15 层, 增长率为 1.2^[11]。计算区域的总节点和网格数分别为 2.1×10^6 和 6.8×10^6 。

控制方程应用有限体积法进行离散。湍流模型选择可实现的 $K-\epsilon$ 模型(realizable $K-\epsilon$)并选用压力梯度效应增强壁面处理^[15]。水流密度为 998.2 kg/m^3 , 水流速度沿 X 轴方向为 0.6 m/s, 压力出口选择 0 Pa, 湍流强度为 5%, 湍流黏度比为



(a)



(b)

图 3 网板冲角为 37.5°时周围网格划分

(a) 局部网格; (b) 网板周围网格。

Fig. 3 Computational grid partitions around the otter board at the angle of attack of 37.5°

(a) local grids; (b) grids around the otter board.

10. 网板壁面和数值水槽壁面设置为无滑移。求解方法选择 SIMPLE。

1.3 控制方程以及相关参数定义

研究中假设流体定常且不可压缩，控制方程包括连续性方程和 N-S 方程：

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} \tag{2}$$

式中， \vec{V} 为流体速度； t 为时间； ρ 为流体密度； P 为压力； μ 为黏性系数； \vec{F} 为体积力。

网板水动力性能相关参数有升力 F_L 、升力系数 C_L 、阻力 F_d 、阻力系数 C_d 、升阻比 K 、力矩 M_z 、力矩系数 C_{Mz} ，相关计算公式如下：

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho S V^2} \tag{3}$$

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho S V^2} \tag{4}$$

$$C_{mz} = \frac{2M_z}{\rho b S V^2} \tag{5}$$

$$C_{mx} = \frac{2M_x}{\rho c S V^2} \tag{6}$$

$$C_{my} = \frac{2M_y}{\rho b S V^2} \tag{7}$$

$$K = \frac{c_1}{c_d} \tag{8}$$

式中， ρ 为流体密度(kg/m³)， S 为网板投影面积(m²)， V 为水流速度(m/s)， b 为网板翼展， c 为网板翼弦， F_d 为网板阻力， F_L 为网板升力(N)， M_z 为俯仰力矩(N·m)， M_x 、 M_y 分别为横向力矩和纵向力矩， K 为升阻比。

2 结果与分析

2.1 板面夹角、展弦比对网板水动力系数的影响

随着板面夹角的增加，升力系数、阻力系数逐渐减小，力矩系数基本保持不变(图 4)。1 号、2 号和 4 号网板升力系数均在 40°冲角时达到最大，3 号网板升力系数最大时冲角为 42.5°。其中 1 号网板的最大升力系数为 1.264。不同板面夹角网板

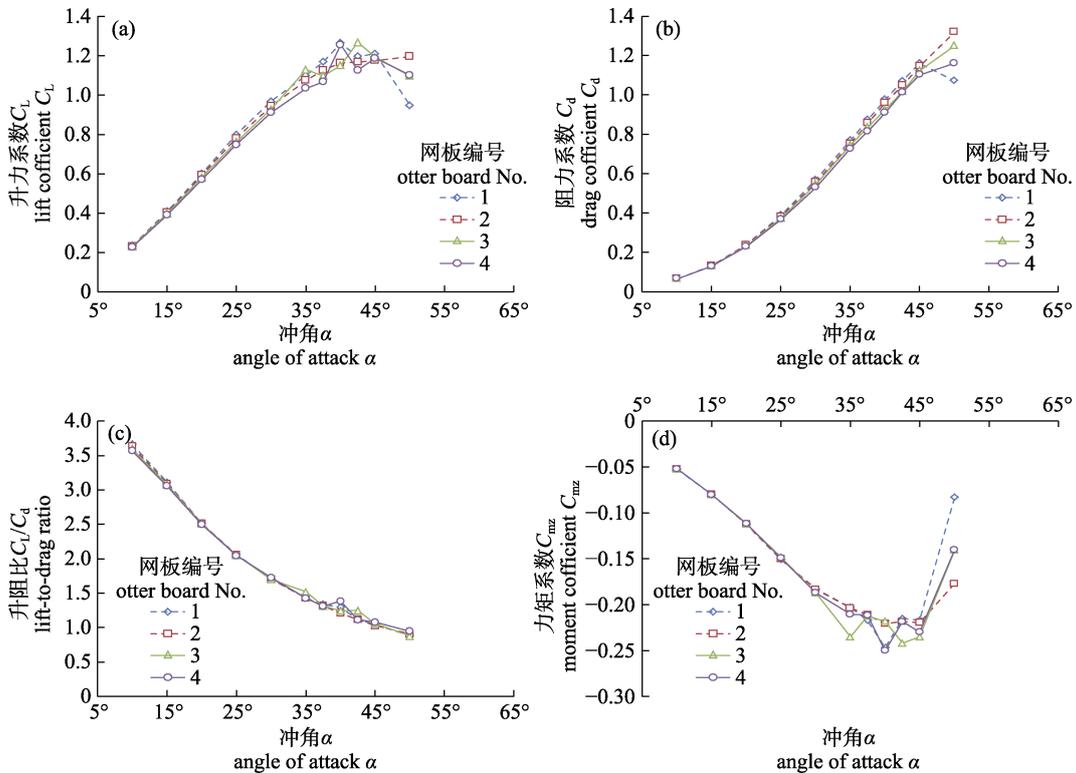


图 4 不同板面夹角下网板升力系数(a)、阻力系数(b)、升阻比(c)、力矩系数(d)与冲角的关系
 Fig. 4 Relationship between lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (c), moment coefficient (d) and angle of attack of the otter boards at different Dihedral angle

升力系数随冲角变化趋势趋于一致, 即冲角在临界冲角以下时, 升力系数随冲角的增大而增大, 冲角大于临界冲角时升力系数开始下降; 阻力系数随着冲角的增加而增加, 其中 1 号网板和 4 号网板在 50°冲角时阻力系数有下降趋势; 升阻比随着冲角的增加而减小, 均在冲角为 10°时达到最大; 力矩系数随着冲角的增加而减小, 当冲角大于临界冲角时力矩系数开始增加, 其中 1 号网板力矩系数绝对值最小值为 0.0524。

随着展弦比的增加, 升力系数、阻力系数逐渐增大, 力矩系数逐渐变小(图 5)。1 号和 9 号网板升力系数在 40°冲角时达到最大, 5 号和 13 号网板升力系数分别在冲角 42.5°和 37.5°时达到最大。其中 13 号网板升力系数最大值为 1.482。不同展弦比网板升力系数随冲角变化趋势趋于一致, 即冲角小于临界冲角时升力系数随着冲角的增加而增加, 冲角大于临界冲角时升力系数随着冲角的

增加而减小; 阻力系数随冲角的增加而增加, 但在冲角为 50°时阻力系数有所降低; 升阻比随着冲角的增加而减小; 力矩系数随着冲角的增加而减小, 当冲角大于临界冲角时力矩系数开始增加, 均在 10°时力矩系数绝对值达到最小, 其中 13 号网板的力矩系数为-0.0735。

2.2 13 号网板的表面压力分布以及流场分布

13 号网板的原型为我国近海小型拖网船使用的网板, 原型网板的翼展为 0.74 m、翼弦为 1.3 m、板面夹角为 21.5°、展弦比为 0.569, 在实际生产中表现出水动力性能欠佳^[16], 通过对水动力的比较发现, 展弦比为 0.7、板面夹角 16°的 13 号网板水动力性能优于原型网板的水动力性能。基于此, 我们重点对优选出的 13 号网板进行了分析研究。基于 $K-\epsilon$ 湍流模型对网板表面压力分布及周围流场进行数值可视化。网板前端是最开始接触水流的地方, 迎流面与背流面之间的压力差异最大。

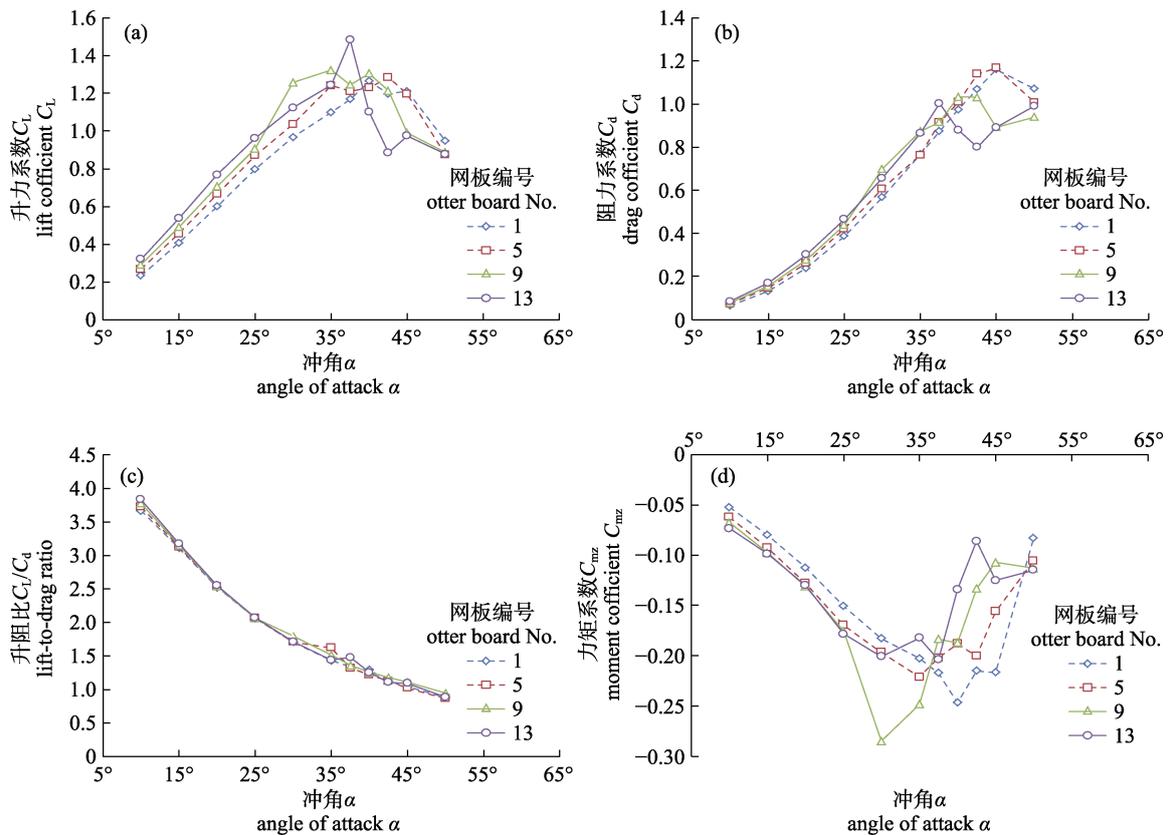


图 5 不同展弦比下网板升力系数(a)、阻力系数(b)、升阻比(c)、力矩系数(d)与冲角的关系

Fig. 5 Relationship between lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (c), moment coefficient (d) and angle of attack of the otter boards at different aspect ratios

从网板前端到后端压力逐渐减小。随着冲角的增加，迎流面的压力逐渐增大，并且从前端开始向后端延伸。网板前端压力大于后端压力，形成的压力差有利于网具的扩张(图 6)。

网板背部红色部分流速大，压力减小，因此

产生扩张力。网板迎流面蓝色部分速度小于初始流速，形成涡旋，产生阻力。随着冲角的增大，涡旋越来越明显，表明网板阻力随着冲角的增加而增大。网板迎流面和背流面的速度差随着冲角的增加而增大，并且越来越明显(图 7)。

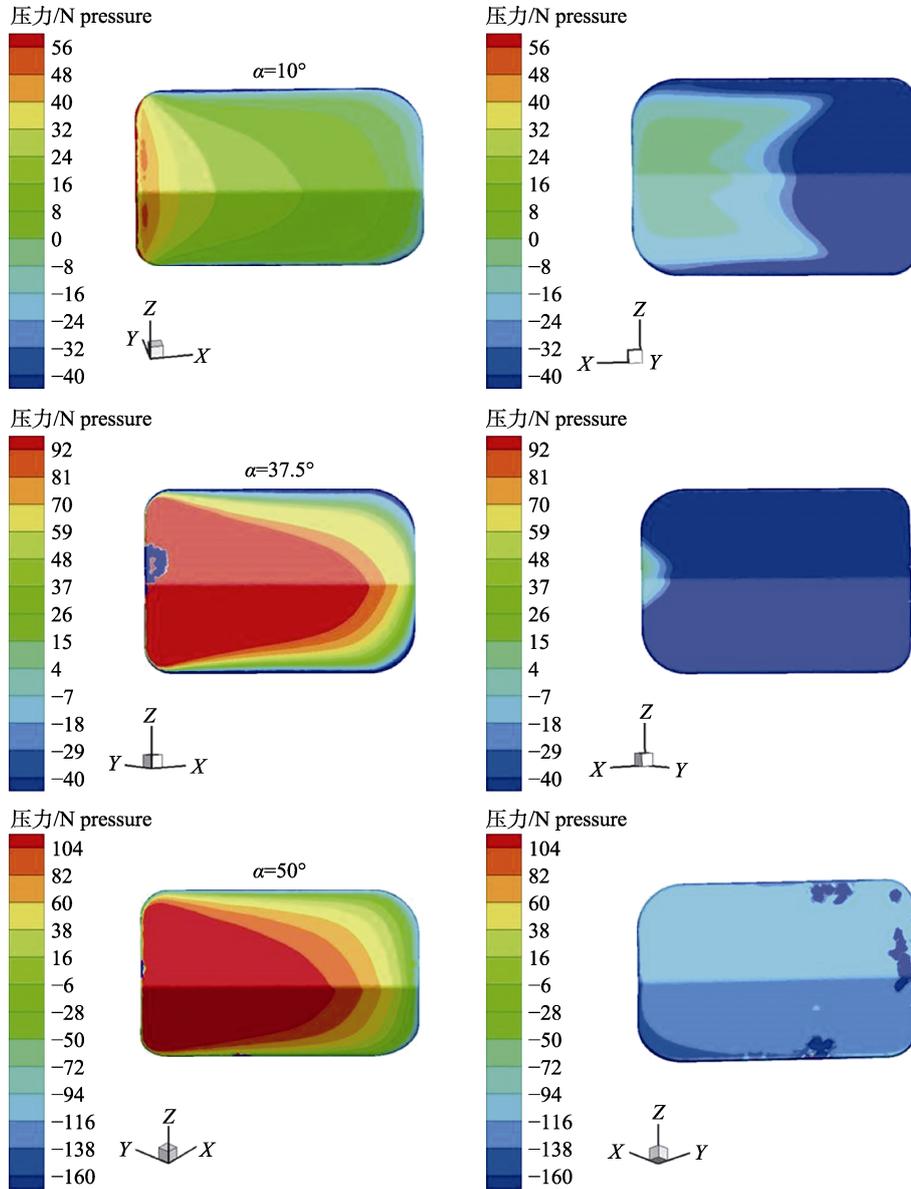


图 6 13 号网板不同冲角下表面压力分布

Fig. 6 Surface pressure distribution of No.13 otter board at different angles of attack

2.3 不同姿态的网板水动力性能与流场特性

负值表示网板处于前倾状态，正值表示网板处于后倾状态。网板发生前后倾时，升力系数随着倾角角度的增加而减小。在倾角为 0°时，升力系数最大，最大值为 1.482；阻力系数随着倾角的

增加而减小；不同倾角的升阻比基本保持在同一水平，均远低于倾角为 0°时的升阻比；力矩系数的绝对值随着倾角的增加而增加，表明网板前后倾时网板稳定性降低(图 8)。

负值表示网板处于内倾状态，正值表示网板

处于外倾状态。不同倾角的升力系数基本不变, 均低于倾角为 0° 时的升力系数, 最大升力系数为 1.482; 阻力系数和升阻比随着倾角的增加而减小; 力矩系数的绝对值在倾角为 0° 时最大, 并且随着倾角的增大而减小(图 9)。

当网板发生内外倾斜时, 随着倾斜角度的增加, 迎流面压力中心向网板前端偏移不明显, 即内外倾对压力中心的偏移影响不明显, 背流面压力变化亦不明显(图 10)。网板后方上下两侧水流速度(红色部分)明显大于网板后方流速(蓝色部

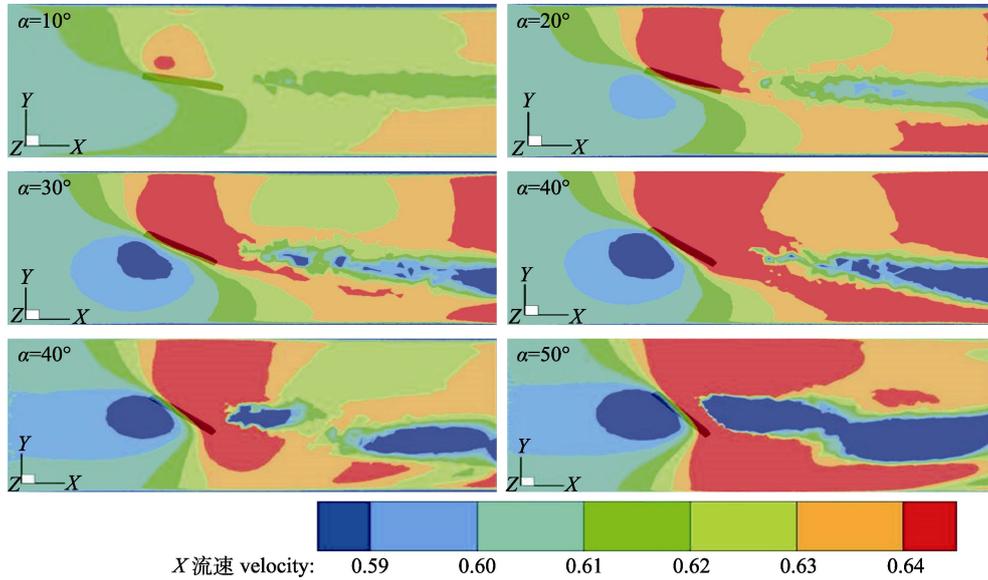


图 7 13 号网板不同冲角下流场分布

Fig. 7 Flow field distribution of No.13 otter board at different angles of attack

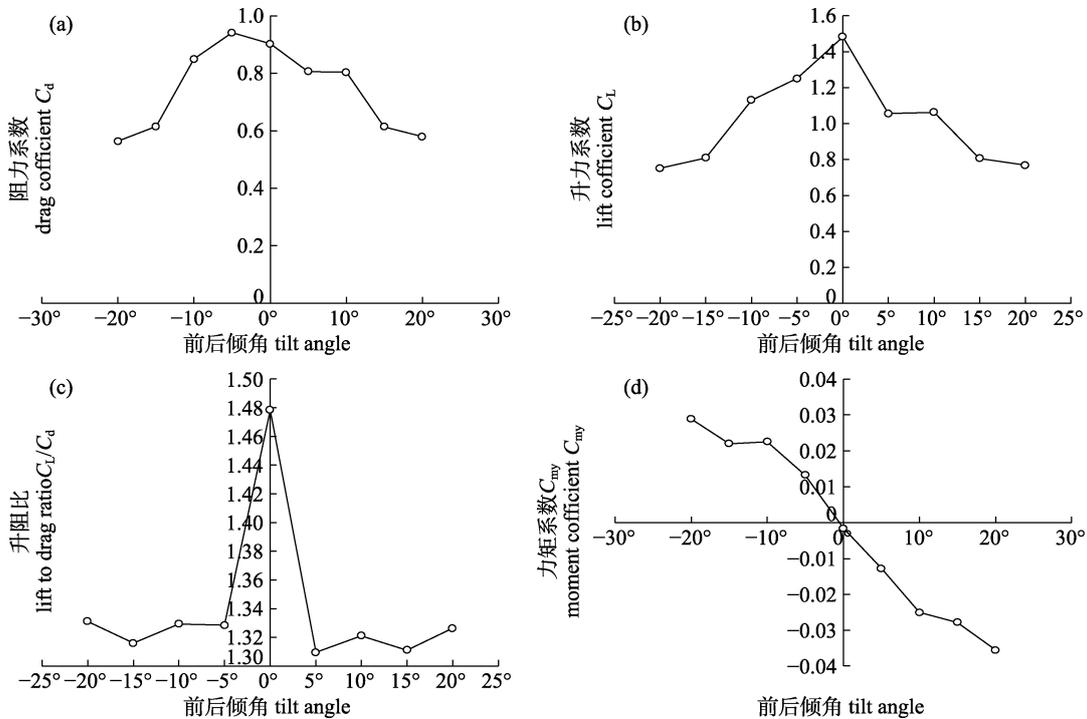


图 8 13 号网板 37.5° 冲角下不同前后倾状态下的阻力系数(a)、升力系数(b)、升阻比(c)、力矩系数(d)

Fig. 8 Drag coefficient (a), lift coefficient (b), lift-drag ratio (c) and moment coefficient (d) of No.13 otter board at 37.5° angle of attack under different tilt state

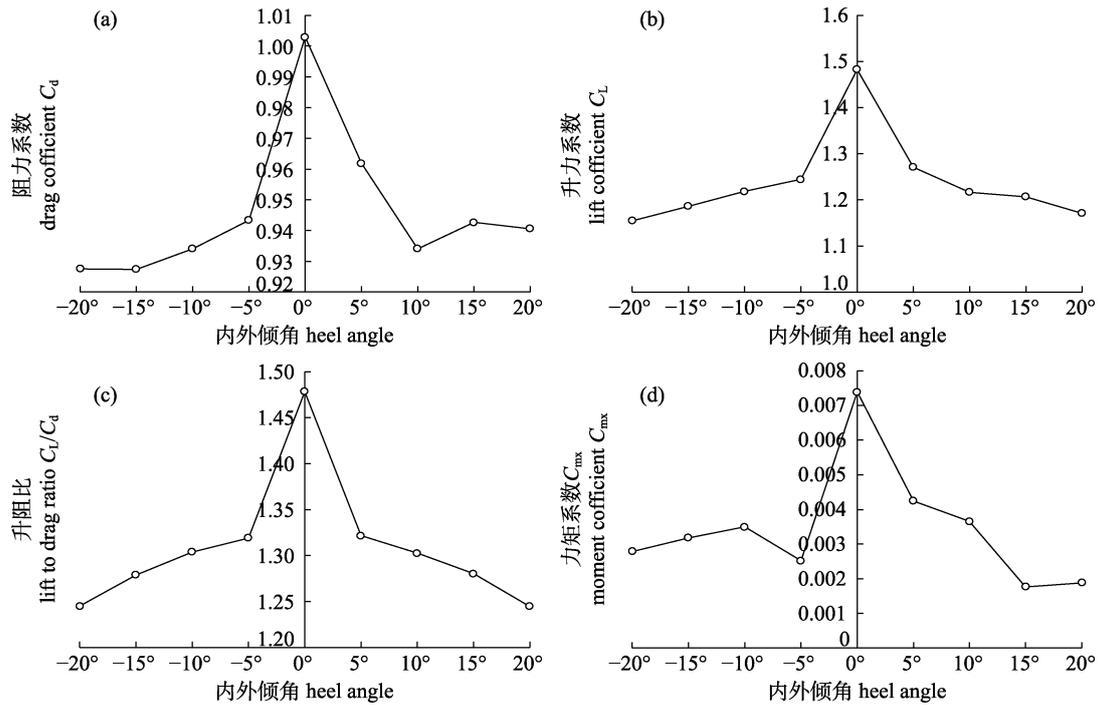


图 9 13 号网板 37.5° 冲角下不同内外倾的阻力系数(a)、升力系数(b)、升阻比(c)、力矩系数(d)

Fig. 9 Drag coefficient (a), lift coefficient (b), lift-drag ratio (c) and moment coefficient (d) of No.13 otter board at 37.5° angle of attack under different heel state

分), 这使得网板迎流面后方产生长长的涡流区, 随着内外倾角的增加, 网板迎流面后的涡流扰动变化不明显(图 11)。

当网板发生前后倾斜时, 网板迎流面前端随着倾斜角度的增加, 变化明显, 并逐渐向迎流面前端上下两侧移动。网板背部前端的压力也随着倾角的增加而逐渐减小。表明当网板前后倾斜时, 随着倾角的增加, 压力中心分别逐渐向迎流面前端上下两侧偏移, 前后倾对网板压力中心的偏移影响显著(图 12)。而网板周围流场变化与内外倾斜时不同, 随着前后倾角度的增加, 网板迎流面后的涡流扰动逐渐变小(图 13)。

3 讨论

3.1 网板水动力系数的影响因素

本研究用 CFD 数值模拟的方法, 对比了不同结构参数 V 形网板的水动力性能。其中水动力系数变化趋势以及临界冲角范围与李崇聪等^[12]结果一致, 但数值上存在一定差异。分析原因可能来自两部分, 一部分来自数值模拟, 例如, 网板模型的厚度、网格的划分方法、边界层参数的设

定、水流速度的设定、网板模型相对数值水槽的位置、湍流模型的选择以及求解算法的选择等。这些因素都会影响最终的结果造成水动力系数的数值差异。2017 年 Xu 等^[11]就数值模拟中不同网格数量对模型结果精度影响的进行了研究, 设置了 4 种数量水平的网格数量, 比对水槽模型试验的结果。结果显示, 随着网格数量的增加, 计算结果精度也会增加。因此, 选择一种合理准确的试验方法来研究网板的水动力十分必要。首先, 研究时要设定一个标准的方法来进行对照参考^[17], 如对照实际测量或者水槽模型试验得到的网板水动力数值。对照实际测量或者水槽试验的数值, 选择不同的模型方法对数值上的差异进行比较分析, 才能更好地确定选择哪种模型方法更合理准确。

另一部分原因可能来自网板的结构参数。因为结构参数的变化是影响网板水动力的重要因素^[18], 本研究主要考虑了展弦比和板面夹角对 V 形网板水动力的影响变化。对于本文中的小展弦比网板, 由于存在大的横向流动, 网板厚度和板面夹角对水动力系数的影响有限^[19], 不及展弦比

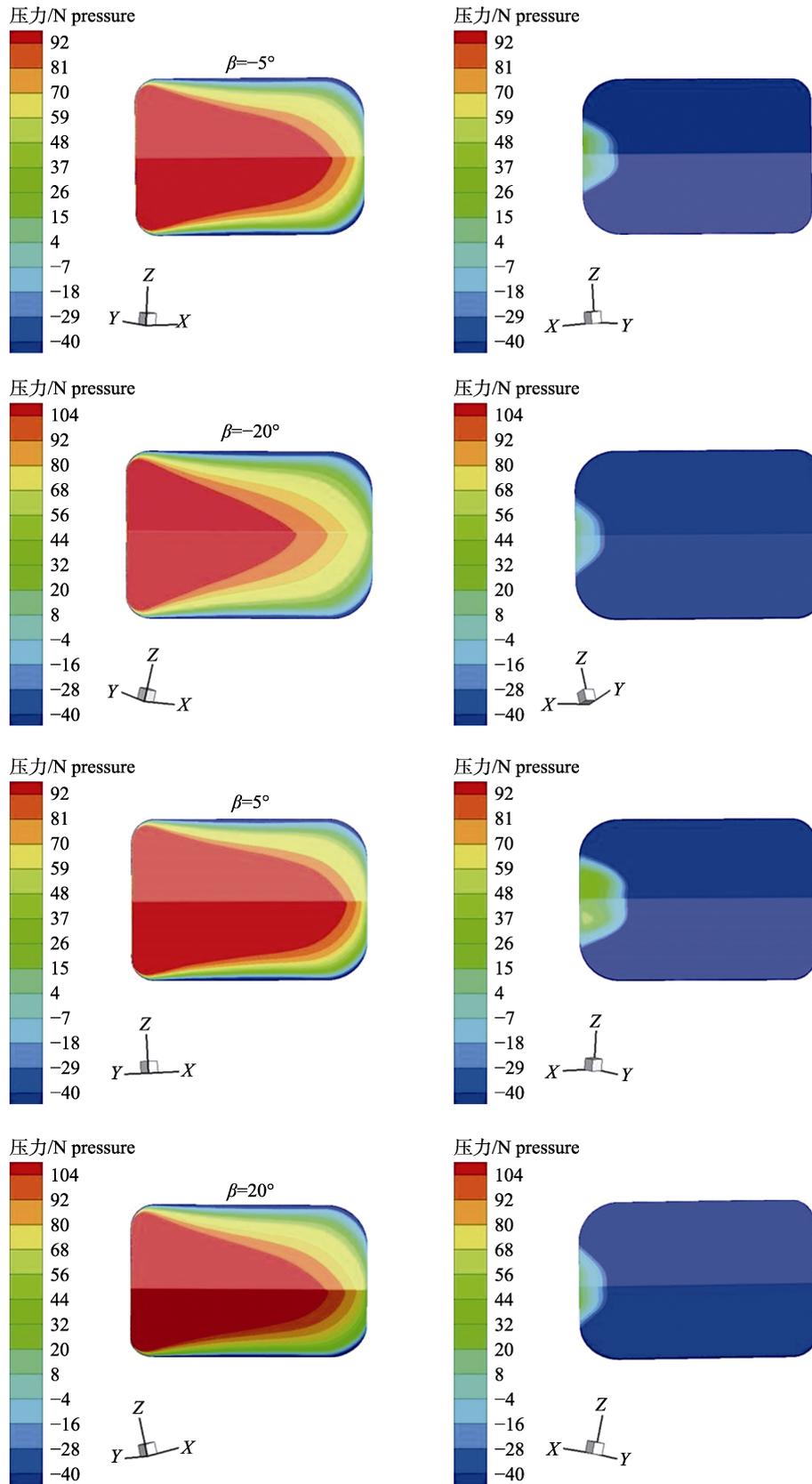


图 10 13 号网板 37.5°冲角下不同内外倾的表面压力分布

Fig. 10 Surface pressure distribution of No.13 otter board under different heel state at an Angle of attack of 37.5°

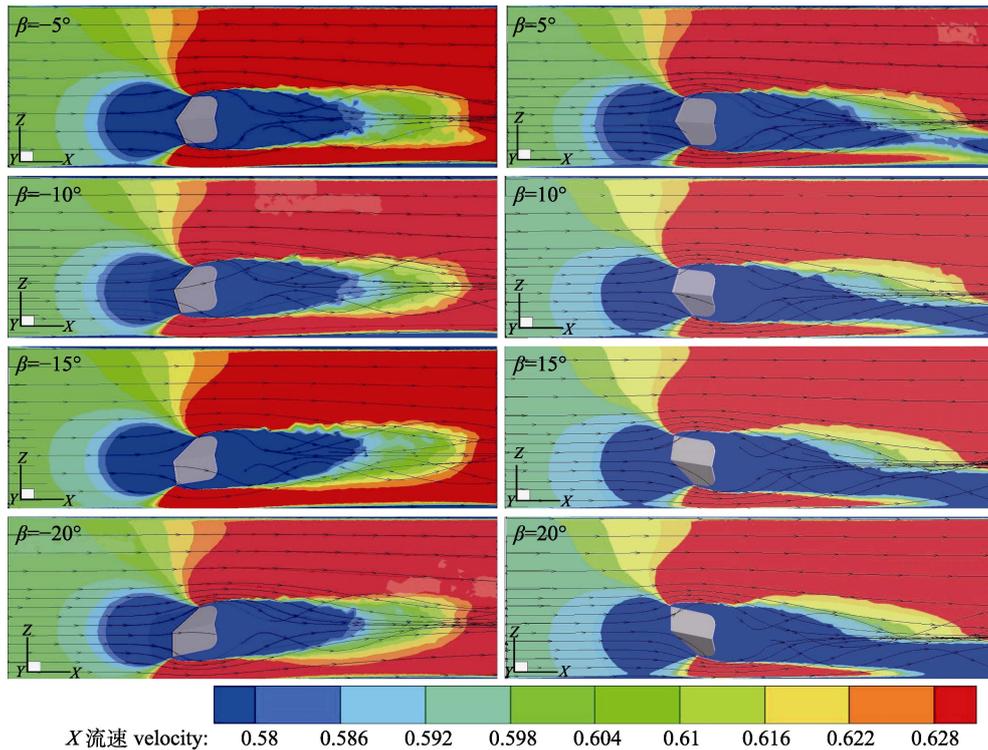


图 11 13 号网板 37.5°冲角下不同内外倾的流场分布

Fig. 11 Flow field distribution of No.13 otter board under different heel state at an Angle of attack of 37.5°

变化的影响明显, 本文结果也应证了这一观点。不同网板类型本身基本的结构参数决定了网板的绕流特性。还有一些其他结构对网板水动力性能以及周围流态有着一定影响, 例如, 网板沉铁、前缘开缝、双翼机翼、导流板以及绕流器等。在网板上安装沉铁加速网板下沉的同时, 也改变了网板的重心, 使其不能与网板的压力中心和拖曳中心重合, 导致网板工作时发生倾斜, 降低了网板的水动力系数与稳定性^[2]。网板在实际作业过程中, 处于最佳的工作冲角时会表现出良好的扩张性能。当受到曳纲、手纲的张力以及网板自身重力等不在同一平面的作用力, 或者拖曳过程中遇到障碍物的碰撞时, 网板的最佳工作冲角都将会改变^[2], 并且网板易处于倾斜状态, 其作业性能受到影响。本文通过数值模拟对不同倾斜状态的网板的水动力性能进行模拟分析。从网板周围流场分布可以看出, 网板发生倾斜时后部出现的涡流是影响其性能的主要因素。在实际使用时, 可以对网板的结构进行改装, 如开缝或者安装导流板, 来改善网板周围的流态, 减小网板的阻力,

增加网板的稳定性^[20]。

3.2 网板工作姿态对稳定性的影响

网板曳行时受到曳纲张力、手纲张力、网板重力以及海底摩擦力等多个力的作用。根据网板的受力分布得知网板存在 6 个自由度^[21]。在受到外力影响时, 网板在每个自由度上都可能发生角度倾斜, 打破了网板的平衡状态, 影响网板稳定。例如, 当网板发生 20°前后倾斜时, 网板阻力由 43.25 N 变成 24.32 N, 减少了 43%。同时, 升力减少了 49%, 力矩系数绝对值增加了 166%; 从网板发生倾斜时周围流场及迎流面表面压力可视化结果分析, 由于流体具有黏性, 网板后部边界层分离时在分离点后产生了涡旋。网板发生倾斜时, 改变了水流与网板表面的夹角和接触时间, 网板后方上下两侧水流速度大于网板后方流速产生压差阻力, 其随着倾角的增加而逐渐减小, 不仅减小了网板的扩张力, 还使得网板迎流面上下两侧的受力不均, 导致了网板压力中心的偏移与网板重心不再重合, 打破了网板平衡。网板前后倾时, 网板迎流面前端压力随着倾角的增大逐渐向两端

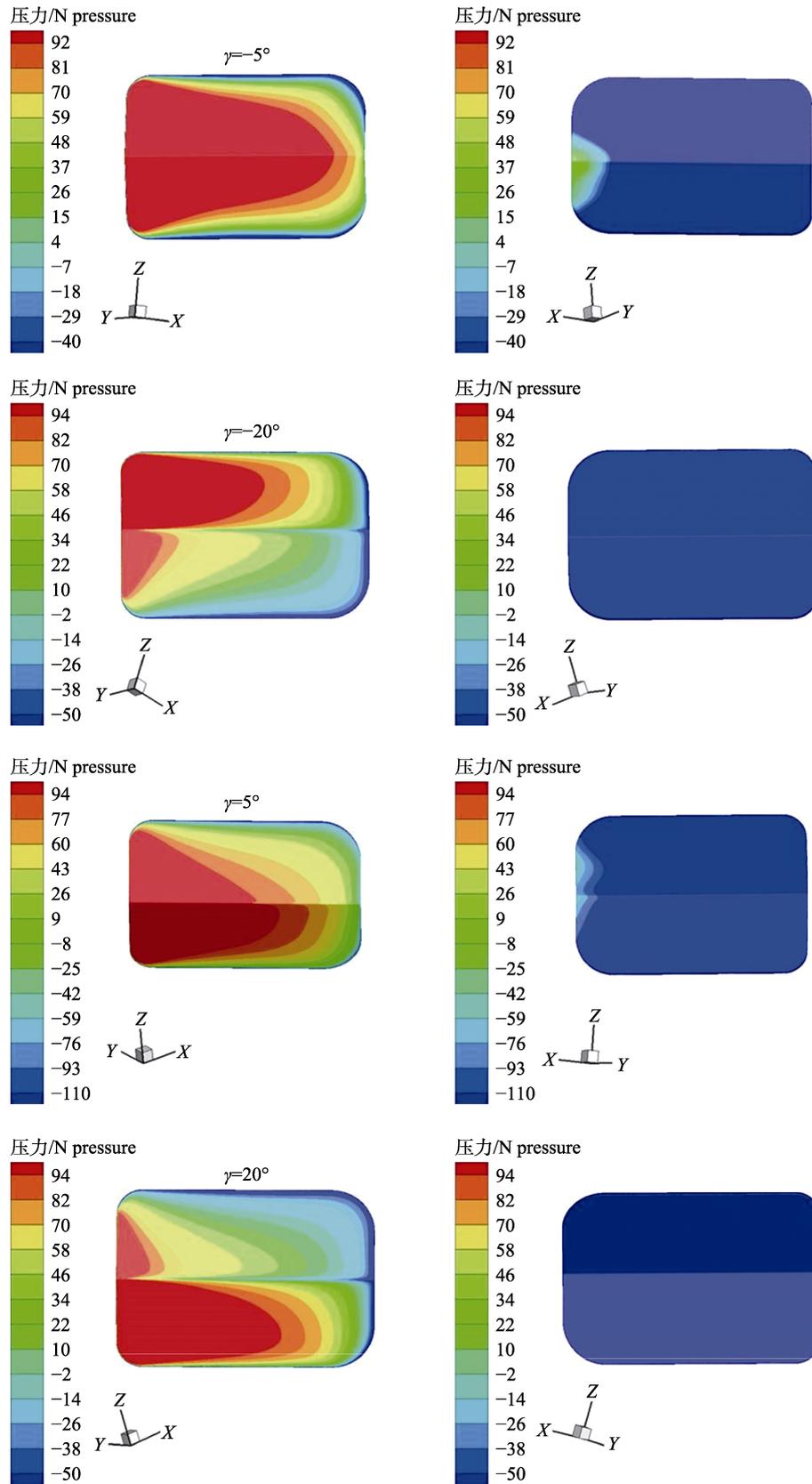


图 12 13 号网板 37.5°冲角下不同前后倾的表面压力分布

Fig. 12 Surface pressure distribution of No.13 otter board under different tilt state at an Angle of attack of 37.5°

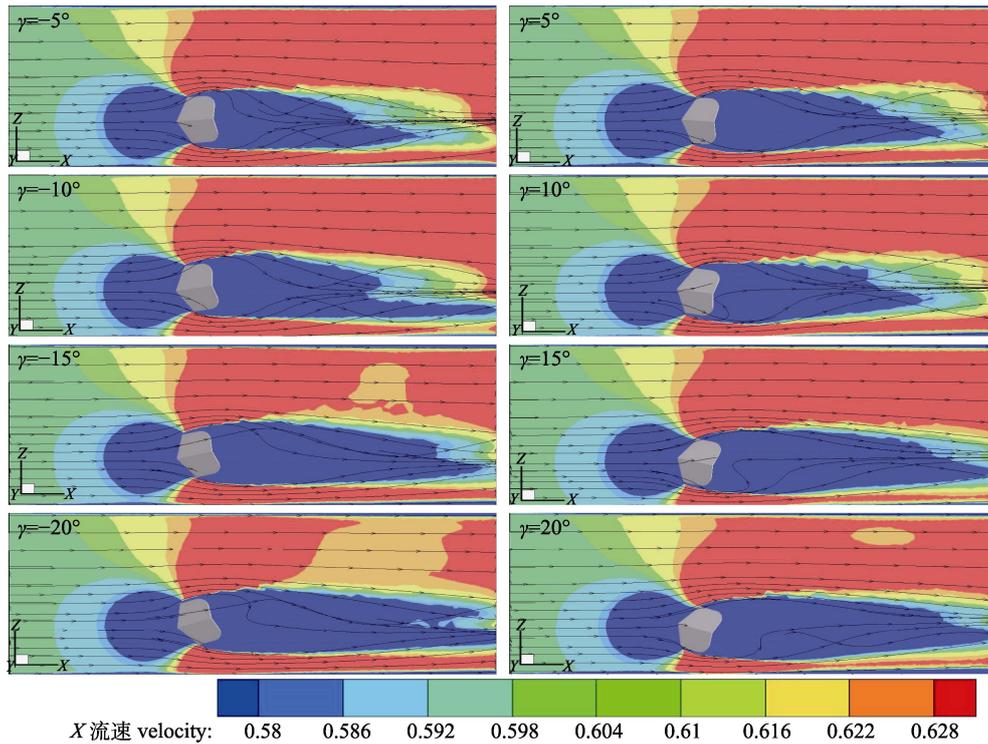


图 13 13 号网板 37.5°冲角下不同前后倾的流场分布

Fig. 13 Flow field distribution of No.13 otter board under different tilt state at an Angle of attack of 37.5°

发生明显偏移,背流面前端压力减小,直观地体现了网板压力中心的移动情况,表明网板的倾斜已经严重影响了网板的稳定和扩张。通过本文的模拟结果分析发现当网板发生倾斜时网板的压力中心会发生偏移,使得网板的压力中心、网板的重心、拖曳中心不能重合,产生的翻转力矩会继续加剧网板的倾斜程度,直至网板发生倾覆进而影响其作业性能^[2]。在实际作业过程中,通过调整曳纲长度、曳纲固结点、手纲固结点、加装三角架铁链等装置以及改变拖速来调整、校正网板的倾斜状态,使其恢复初始的最佳工作状态,保持网板的稳定性^[19]。

V形网板的工作冲角一般在 37°~42°,最好有不大于 5°的内外倾以便于更好的越过海底的障碍物^[7-19],网板遇到外力发生倾斜时,工作冲角对网板姿态的恢复起着重要作用^[22],当工作冲角小于临界冲角时,以发生 20°前后倾为例,网板迎流面下端压力差大于上端压力差,上下端冲角的变化使扩张力减小产生反方向的恢复力矩,使网板恢复到最佳的无倾斜状态;相反,工作冲角大于

临界冲角时,迎流面上下两端的压力差增大,压力中心向下偏移,产生自转力矩会造成网板的翻倒。所以让网板处于最佳的工作冲角会增强网板的稳定性能^[2],可在网板连接的时候调整网板叉纲固结点的位置进行前移或者后移来减小冲角,在网板曳纲固结点和网板前缘增加一段限制链或曳纲三角架稳定工作冲角,来保证网板的稳定^[4]。

3.3 数值模拟中网板水动力性能的研究方法

V形网板为底层拖网网板,海底底质是影响网板稳定性能的一个重要因素,如网板与底质相互作用、底质对网板的摩擦以及碰撞等。底拖网网板作业时,不同的底质类型会给网板的作业性能带来不同的影响,如黏土海底会给网板作业带来更大的阻力,砂石底质与网板之间的摩擦碰撞对网板的作业状态和性能造成影响。2016年 Jun等^[3]运用 CATIA 软件模拟了网板与海底之间的相互作用,研究的主要影响因素有冲角、网板前角、长度以及深度来优化设计最佳作业形态的网板。结果显示,冲角、接触面积的增加都会增加网板的平均作用力,网板与海底的接触中,随着网板

底部接触的减少, 纵向接触的增加, 网板的平均作用力增加。2020 年 You 等^[23]对不同参数网板在不同水层的水动力性能进行了实验研究, 优选出在底层作业中最佳的高升力网板。对高升力网板的底部加装了滚轮, 通过水槽试验和海上实测检验了网板在砂石底质海底作业的性能, 结果显示, 改装后的网板在海底拖网作业中具有优异的性能。不同类型的底质会对网板的作业状态和性能造成不同的影响, 针对不同的底质类型, 对网板进行不同结构上的优化可以大幅度提高其作业性能。本文在试验时考虑了底层水流对网板的性能影响, 模拟了网板发生碰撞产生不同前后倾、内外倾时对网板水动力的影响, 试验时也可以构建海底模型来模拟底质对网板的影响^[24]。物理模型常常忽略一些网板的不必要特征, 使结果出现偏差, 模型的材料、厚度、表面粗糙度以及尺度比均会影响结果^[25-26]。模拟时网格单元大小的设定、边界层的设定以及划分方式的不同也会对模拟结果存在一定的影响, 但影响程度有限^[11]。如, 李崇聪^[12]将水槽划分为 3 个区域, 中间区域网格密度为两边区域网格密度的一倍; 本文采用局部加密方式, 对网板和水槽分别设置不同的网格大小, 并对网板进行加密处理。此外, CFX 具有网格划分精度高、求解精度高等优点, 适合用来模拟网板受力, 预测网板的升力系数、升阻比准确性高; 而 Fluent 更适合模拟速度场。采用 CFX 和 Fluent 相结合的方法来模拟网板的性能, 将会得到更准确的结果。网板研究中使用的湍流模型主要有 Realizable $K-\varepsilon$ 、标准 $K-\omega$ 、(SST) $K-\omega$, 其中 Realizable $K-\varepsilon$ 在方程中增加了一个条件, 使得在流动中有效的增加了精度和可信度; 标准 $K-\omega$ 考虑了小雷诺数和剪切流, 尤其在处理近壁面问题上有很多优势, 在平板绕流、圆柱绕流中应用较为成功; (SST) $K-\omega$ 模型结合了 $K-\omega$ 模型对边界层的模拟优势和 $K-\varepsilon$ 模型对远场边界依赖小的特点对系数进行了修正, 增强了对强逆压梯度及分离流动的模拟精度。Fluent 求解中的算法有 SIMPLE、SIMPLEC 和 PISO, 研究中常用的是 SIMPLE 和 SIMPLEC。SIMPLE 算法是先预测在修正, 而 SIMPLEC 与 SIMPLE 算法相同, 但修改

了压力修正项的系数, 加快了收敛速度。

流场可视化是直观了解网板水动力性能的一种手段, 可以清楚的观察到网板周围的流态分布, 为网板的结构优化提供理论基础依据。目前, 可视化方法主要有数值模拟、线条法、氢气泡法以及粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV)。数值模拟法凭借省时省力、直观等优点, 成为常用的可视化方法。

参考文献:

- [1] Liu H W. Study on hydrodynamic behavior of the bat-wing otter board[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. [刘宏伟. 蝠翼式拖网网板的水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.]
- [2] Liu Z Q, Xu L X, Tang H, et al. Hydrodynamic performance and around flow field of biplane-type otter board with different working positions[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(2): 87-98. [刘志强, 许柳雄, 唐浩, 等. 不同工作姿态下立式双曲面网板水动力及周围流场特性研究[J]. 南方水产科学, 2020, 16(2): 87-98.]
- [3] Jun C W, Sohn J H, Park S H. Effect analysis of design parameter of trawl door by considering interaction with seabed[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(11): 1515-1522.
- [4] Sun M C. Marine fishery technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014:93-100. [孙满昌. 海洋渔业技术学[M].北京: 中国农业出版社, 2014:93-100.]
- [5] Zhang X, Wang M Y, Xu B S. A Primary study on type, structure and performance of trawl otter board[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004(S1): 107-113. [张勋, 王明彦, 徐宝生. 拖网网板型式、结构与性能的研究与应用进展[J]. 中国水产科学, 2004(S1): 107-113.]
- [6] Liu J, Huang H L, Chen S, et al. Hydrodynamic characteristics of low aspect ratio vertical cambered otter board[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(11): 1742-1749. [刘健, 黄洪亮, 陈帅, 等. 小展弦比立式曲面网板的水动力性能[J]. 水产学报, 2013, 37(11): 1742-1749.]
- [7] Balash C, Sterling D, Broadhurst M, et al. Hydrodynamic evaluation of a generic sail used in an innovative prawn-trawl otter board[C]//Proceedings of ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31-June 5, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada. 2015
- [8] Chu W H, Chen G, Ye X C, et al. Hydrodynamic performance and structural response characteristics of the double-

- slotted vertical cambered V-Type otter board[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2020, 5(4): 201-209.
- [9] Liu H W, Zhao Y P, Bi C W. Numerical simulation on hydrodynamic performance of rectangular otter boards with different aspect ratios[C]. *Proceedings of the 14th National Symposium on Hydrodynamics and the 28th National Symposium on Hydrodynamics (Volume 1)*, 2017. [刘宏伟, 赵云鹏, 毕春伟. 不同展弦比的矩形曲面网板水动力性能的数值模拟 2017[C]. 第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集(上册), 2017.]
- [10] Xu Q C, Huang L Y, Li X S, et al. Parameter optimization of a rectangular cambered otter board using response surface method[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108475.
- [11] Xu Q C, Huang L Y, Zhao F F, et al. Study on the hydrodynamic characteristics of the rectangular V-type otter board using computational fluid dynamics[J]. *Fisheries Science*, 2017, 83(2): 181-190.
- [12] Li C C. Preliminary study on the hydrodynamic performance and numerical simulation of a V-shaped otter board[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [李崇聪. V形网板水动力性能和数值模拟初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [13] Liu Z Q, Xu L X, Tang H, et al. Hydrodynamic performance and flow field visualization of hyperboloid otter board[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(8): 1360-1370. [刘志强, 许柳雄, 唐浩, 等. 立式双曲面网板水动力性能及流场可视化研究[J]. *水产学报*, 2020, 44(8): 1360-1370.]
- [14] You X X, Hu F X, Zhuang X, et al. Effect of wingtip flow on hydrodynamic characteristics of cambered otter board[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 222: 108611.
- [15] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\omega$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.
- [16] Li C C, Liang Z L, Huang L Y, et al. Hydrodynamic study on a vee type otter board of small trawl vessels[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(11): 69-73. [李崇聪, 梁振林, 黄六一, 等. 小型单拖网渔船 V形网板水动力性能研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(11): 69-73.]
- [17] Wang L, Wan R, Yu W W, et al. Research on performance and application of otter board at home and abroad[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 16-24. [王磊, 万荣, 余雯雯, 等. 拖网网板性能与国内外应用研究进展[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(1): 16-24.]
- [18] Wang L, Wang L M, Feng C L, et al. Influence of main-panel angle on the hydrodynamic performance of a single-slotted cambered otter-board[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2017, 2(5): 234-240.
- [19] Guo G X, Liu T Y, Huang X H et al. Theory research and practice of the hydrodynamic of otter board[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2008: 34-40. [郭根喜, 刘同渝, 黄小华, 等. 拖网网板水动力学理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2008: 34-40.]
- [20] Zhang X, Wang J H, Wang M Y, et al. Hydrodynamic characteristics of rectangular cambered V type otter board—I: Relationship between cambered ratio of fairwater fin and hydrodynamic characteristics of otter board[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004(S1): 5-8. [张勋, 王锦浩, 王明彦, 等. 矩形 V形曲面网板水动力性能的研究—I 导流板曲率与网板水动力性能的关系[J]. *中国水产科学*, 2004(S1): 5-8.]
- [21] Chen Y L, Yao Y M, Zhang Z M, et al. Numerical analysis of a mid-water trawl system with a 6-DOF otter board model and sea-trial verification[J]. *IEEE Access*, 2018(6): 68429-68439.
- [22] Xu L X. Theory and Design of Fishing Gear [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004:132-144. [许柳雄. 渔具理论与设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004:132-144.]
- [23] You X X, Hu F X, Kumazawa T, et al. Performance of new hyper-lift trawl door for both mid-water and bottom trawling[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 199: 106989.
- [24] Wang M Y, Wang J H, Zhang X, et al. Hydrodynamic characteristics of vertical V type otter board[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(3): 311-315. [王明彦, 王锦浩, 张勋, 等. 立式 V形曲面网板的水动力性能[J]. *水产学报*, 2004, 28(3): 311-315.]
- [25] Liu Z Q. The hydrodynamic performance and flow field visualization of mid-water otter board—taking the biplane-type otter board as an example[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. [刘志强. 中层网板水动力性能及流场可视化研究—以立式双曲面网板为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.]
- [26] Mellibovsky F, Prat J, Notti E, et al. Otterboard hydrodynamic performance testing in flume tank and wind tunnel facilities[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149: 238-244.

Effect of tilt state on the hydrodynamics and surrounding flow field characteristics of V-shaped otter board

LIU Jingbin¹, TANG Hao^{1,2,3,4,5}, XU Liuxiong^{1,2,3,4,5}, LIU Zhiqiang¹, ZOU Baiqiang¹, CHU Wenhua¹

1. College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: The V-type otter board is an important part of the single-ship bottom-trawl system. In order to explore the hydrodynamic variations of V-shaped otter boards in various working postures, we applied a numerical simulation method (computational fluid dynamics, CFD) to compare the hydrodynamic characteristics of the otter board with different aspect ratios (0.4, 0.5, 0.6, 0.7) and dihedral angles (16° , 19° , 22° , 25°), then selected one V-shaped otter board with superior hydrodynamic characteristics. Next, the hydrodynamic coefficient, surrounding flow field distribution, and surface pressure variation of this otter board were each analyzed in different positions of forward, backward, inward, and outward inclinations of 5° , 10° , 15° and 20° . The results show that: 1) the V-shaped otter board (No.13 otter board) with aspect ratio $\lambda=0.7$ and dihedral angle $I=16^\circ$ has the best hydrodynamic performance. The lift coefficient reaches its maximum value of 1.482 at 37.5° . The expansion efficiency reaches the maximum when the angle of attack is 10° . 2) With an increasing angle of attack, the pressure on the headstream surface of the No.13 otter board gradually increases, and the velocity difference between the headstream surface and the back flow surface of the otter board also increases. 3) When the No.13 otter board has different degrees of forward and backward inclination or inward and outward inclination, the lift coefficient decreases, and the drag coefficient decreases with increasing inclination angle. 4) With the increasing inclination angle, the pressure center of the headstream surface moves to the front of the otter board, and the change of the back vortices on the center of the otter board surface is not obvious. When the otter board is tilted back and forth, the pressure distribution of its flow face clearly changes; that is, with increasing inclination, the pressure center gradually moves up and down the front end, and the vortex of the otter board's center surface gradually decreases. The results of this study provide a scientific reference for predicting the variation of hydrodynamic characteristics of an otter board with different working positions and adjusting its stability.

Key words: V-shaped otter board; stability; pressure distribution; flow field distribution; hydrodynamic coefficients

Corresponding author: TANG Hao. E-mail: htang@shou.edu.cn