

基于CFD的多叶可控网板水动力特性及压力流场研究

姜书侠¹, 孔祥洪^{1,2}, 黄小双¹, 叶旭昌^{1,2}, 曹道梅^{1,2}

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室/国家远洋工程技术研究中心, 上海 201306

摘要: 传统网板通过改变曳纲长度和拖速控制作业深度, 通过改变网板与曳纲和手纲的固结点位置调整作业姿态, 操作复杂。为了给可控变水层网板的设计研究提供科学参考, 设计了一款多叶可控网板, 通过数值模拟仿真计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 探究其不同部位 (上端、下端) 叶片的转动方向和转动角度 ($-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$) 对其水动力性能的变化影响。结果显示: 1) 叶片闭合时, 多叶可控网板的升力系数在 20° 冲角时达到最大值 0.88; 其升阻比在 5° 冲角时达到最大值 8.85。2) 0° 冲角时, 网板两端叶片朝负方向转动, 升力逐渐减小至 0, 并在转角为 -20° 时, 升力变为相反方向; 两端叶片朝正方向转动, 升力系数先增大后减小, 在转角为 20° 时达到最大值 0.32; 升阻比随叶片冲角的增加而减小。3) 20° 冲角时, 网板两端叶片朝正方向转动, 升力系数不断减小; 叶片朝负方向转动, 升力系数先增大后减小, 在 -10° 转角时达到最大值 1.05; 升阻比在 -20° 转角时达到最大值 5.25。4) 两组冲角下, 两端叶片分别朝正方向转动, Z 轴分力系数均先增大后减小。

关键词: 多叶网板; 翼型; 数值模拟; 水动力; 流场分布

中图分类号: S 971.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Study on hydrodynamic characteristics and flow field visualization of multi-blade controllable otter board based on CFD

JIANG Shuxia¹, KONG Xianghong^{1,2}, HUANG Xiaoshuang¹, YE Xuchang^{1,2}, CAO Daomei^{1,2}

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries/Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai 201306, China

Abstract: Traditional otter board controls working depth by changing length of the warp and towing speed, and adjusts working posture by changing fixed joint positions between otter board, warp and sweep line, which involves complex operation. To provide scientific references for the design and research of controllable variable-water-depth otter boards, we designed a multi-blade controllable otter board and employed computational fluid dynamics (CFD) simulation to investigate the effects of the rotation direction and angle ($-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$) of blades at different positions (Upper and lower ends) on its hydrodynamic performance. The results reveal that: 1) when the blades were closed, the lift coefficient of the multi-leaf controllable otter board reached its maximum value of 0.88 at an attack angle of 20° ; its lift-to-drag ratio peaked at 8.85 at an attack angle of 5° . 2) At an attack angle of 0° , when the blades at both ends of the otter board rotated in a negative direction, the lift gradually decreased to zero and reversed its direction at a rotation angle of -20° ; when the blades rotated in a positive direction, the lift coefficient first increased and then decreased, reaching its maximum value of 0.32 at a rotation angle of 20° ; the lift-to-drag ratio decreased as the rotation

收稿日期: 2024-05-01; 修回日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12172212); 国家重点研发计划项目 (2023YFD2401302); 上海市产业协同创新项目 (XTCX-KJ-2023-17)

作者简介: 姜书侠 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具渔法。E-mail: Jiangsx240200069@163.com

通信作者: 孔祥洪 (1963—), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为人工智能仿生潜航器。E-mail: xhkong@shou.edu.cn

angle increased. 3) At an attack angle of 20° , when the blades at both ends of the otter board rotated in a positive direction, the lift coefficient continuously decreased; when the blades rotated in a negative direction, the lift coefficient first increased and then decreased, reaching its maximum value of 1.05 at a rotation angle of -10° ; the lift-to-drag ratio peaked at 5.25 at a rotation angle of -20° . 4) Under the two angles of attack, when the blades at both ends rotated individually in a positive direction, the Z-axis force coefficient increased first and then decreased.

Keywords: Multi-blade otter board; Aerofoil; Numerical simulation; Hydrodynamic; Flow field distribution

拖网作为渔业中的重要捕捞方式, 具有覆盖水域广泛、捕获物种多样等特点^[1]。2022 年全国拖网渔业总产量 451 万吨, 拖网渔船共计 22 566 艘, 总功率达 516 万千瓦^[2]。巨大的经济产值下, 不可忽视的是成千上万吨的燃油消耗和有限的单船产量。现代单船拖网作业中, 拖网网板的作用是扩大网口、提高捕捞效率, 加速网具下沉、减少渔获逃逸^[3]。实际生产中, 不同阶段对网板的作用需求不同, 如拖网布放和收起阶段中, 应要减小网口扩张, 减轻渔船机械负荷, 而传统网板无法兼顾^[4]。此外, 控制网口深度需要依靠调整渔船速度和曳纲长度, 这不但要求操作者经验丰富, 还对渔船的机械素质要求较高。研究能够调节扩张力大小和变水层拖曳的网板是拖网渔业领域中的重点需求, 备受国内外学者的关注^[5]。

网板的设计与改进应以效益和效率为前提, 需要平衡网板扩张力与阻力的关系, 同时保证网板姿态稳定。网板的结构现已从矩形、V 形、椭圆形、圆盾形等单叶类型, 逐渐发展为带副翼的单叶类型网板和双叶类型网板等^[6]。在这个过程中, 最初的矩形网板发展成矩形曲面网板进行研究^[7]。Liu 等^[8]对底拖网使用的椭圆双开缝网板, 结果显示, 当冲角达到 15° 时, 其升阻比达 4.165, 但椭圆形网板对海底环境影响较大。刘志强^[9]研究的立式双曲面网板具有较好的稳定性, 在数值模拟实验中升力系数为 1.88。庄鑫^[10]研究的高升力双叶型网板在 30° 冲角下最大升力系数可达 2.19。除了基础形状的设计和优化外, 有学者针对网板的不同结构参数进行梯度研究, 也取得了有效进展。Xu 等^[11]的数值模拟研究表明, 矩形网板的最佳展弦比为 0.5, 且更高的展弦比具有更小的临界冲角。Chu 等^[12]研究分析得出垂直曲面 V 形网板基础结构参数状态下的最大升阻比为 5.7。Fukuda 等^[13]通过水槽实验发现, 展弦比和弯曲度均对网板水动力性能有明显影响, 展弦比小于 2.5 时, 网板临界冲角偏大, 弯曲度 15% 时产生最大升力的最佳冲角范围较大。

王明彦等^[14]利用风洞实验得出, 影响立式 V 形曲面网板水动力性能的主要因素依次为板面折角、展弦比和后退角。刘健等^[15]比较了 2 种立式曲面缝翼式网板的性能, 发现合理调节导流翼偏角可以达到优化网板水动力学性能的目的。刘志强等^[16]认为现有研究还应考虑网板发生倾斜时其水动力及周围流场特性的变化。

在研究方法上, Xu 等^[17]分析了计算流体动力学 X 模式 (Computational fluid dynamics X, CFX) 和流体 (FLUENT) 2 种仿真方法对 V 形网板的水动力结果实验影响发现, FLUENT 在网板周围的速度场描绘方面更加精确。Xu 等^[18]还通过中心组合设计法 (Central composite design, CCD) 和响应面分析得出, 矩形弧面网板最大相对弧度为 15.5%、最大弧度位置为 35.1% 时, 展弦比为 2.0 时的性能较好。氢气泡和数字粒子图像测速 (Digital particle image velocimetry, DPIV) 粒子等新技术的加入使得渔具周围流场特点直观地展示出来, 用以验证计算机模拟流场结果^[19-21]。Liu 等^[22]通过循环水槽实验结果总结了展弦比对网板性能的影响, 随着展弦比的增大, 最大升力系数与最大升阻比呈现先增后减的趋势。Wang 等^[23]通过风洞模型检验了一款双叶网板, 在展弦比 2.0、前翼弯度 0.16、间隙比 0.35 时性能最适, 但该方法在实验时对模型在流体中的雷诺数匹配程度要求高。

本研究基于数值模拟方法, 研究叶片转向、叶片转角及冲角等参数对多叶可控网板水动力性能的影响, 并通过流场可视化, 分析不同叶片转角下网板周围流体的变化, 以探究叶片转动对网板运动姿态的影响, 以及多叶可控网板对网口状态的控制策略。

1 材料与方法

1.1 网板结构参数

多叶可控网板模型整体翼弦 (C) 宽 300 mm, 翼展 (L) 长 600 mm, 展弦比 (λ) 2.0。网板结构参数

以及设计变量见图1。多叶可控网板主要分为上、下两部分，每部分由3个翼型叶片组成；叶片弦长100 mm，翼展200 mm，叶片中心面轮廓形状为P50-3翼型，该翼型最大厚度在翼弦的20.5%处，为9.7%；最大曲面在翼弦的46.8%处，为9.57%；其中，上、下端的前叶与中叶可绕自身平行于翼展方向的重心轴转动，设定与网板冲角转

动一致的方向为叶片转动的正方向，与网板冲角转动相反的方向为叶片转动的负方向，上端叶片转角为 θ_1 ，下端叶片转角为 θ_2 ，叶片转动范围为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ [24]。设置叶片闭合状态下的网板冲角范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$ ，间隔 5° ，实验对照设置如表1所示。网板两端尾部的叶片为固定襟翼。

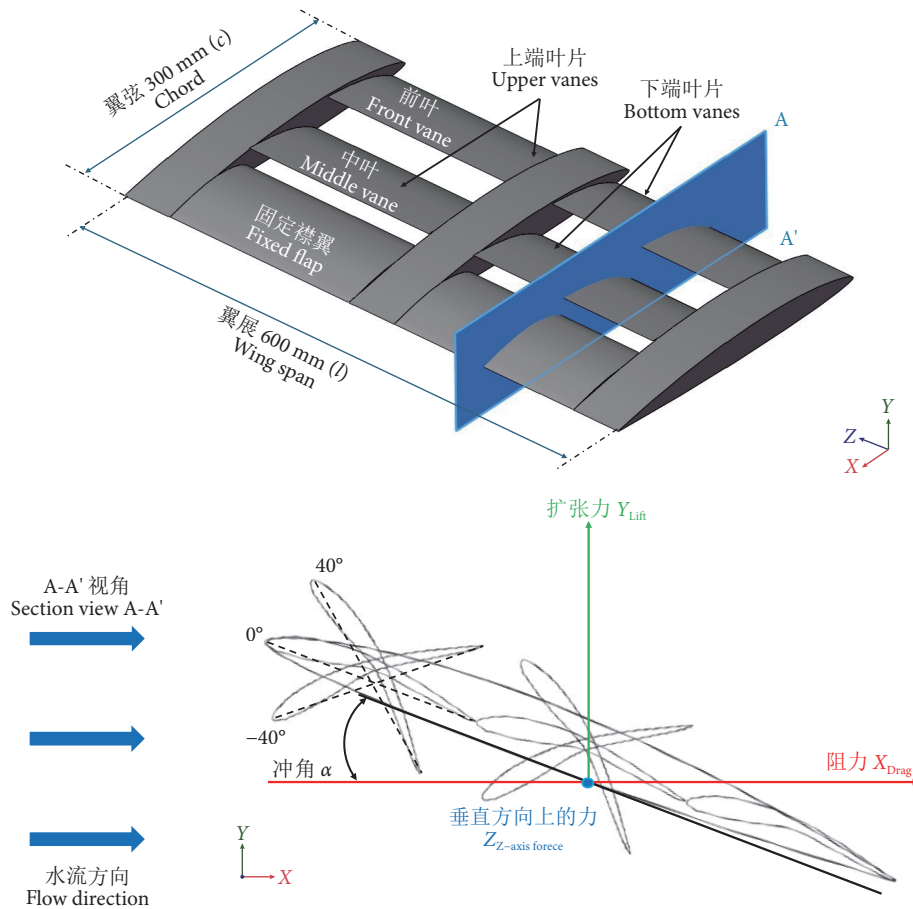


图1 网板结构及叶片转动示意图

Fig. 1 Otter board structure and blade rotation diagram

1.2 数值模拟

本研究使用 Solidworks 2016 三维绘图软件对多叶可控网板进行结构建模。采用数值模拟方法，通过计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 软件 ANSYS 21.0 对雷诺平均 N-S 方程进行求解，描述了不可压缩流体的动力学如图2所示。模型设定位于距离入水口 5.0 m，距离水底高度 1.0 m，网板中心轴距离两侧壁面 2.0 m。为保证数值模拟的有效性，进行了网格无关性验证，分别对 600、800、1 000 和 1 100 万级网格数量的模拟结果进行测试。模拟出的升力与阻力结果的标准差均未超过 0.04，结果表明网格密度的增加，对计算

结果的影响有限，800 万级网格数量足以保证模拟的精度 [25]。计算域中最小单元格尺寸为 5 mm，最大为 100 mm，网板的局部单元格尺寸为 5 mm (图3)。网板的边界处和计算域壁面设置了 5 级膨胀层，增长率为 1.5 ($1.07 < y^+ < 42.34$)。对网板进行局部加密，得到非结构化网格。节点数量和元素总数分别达到了 4.8×10^5 和 8.5×10^6 。采用 $k-\epsilon$ 湍流模型 (Realizable) 求解流动模型的控制方程 [26]。

流体设定为淡水，其密度为 $998.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，黏度为 $0.001 003 \text{ kg} \cdot \text{ms}^{-1}$ 。设定计算域上流入口为速度入口边界，沿 X 轴方向均匀流动，湍流强度为 5%，下流出口设置为充分发展的自由流边界

表1 多叶可控网板冲角以及叶片转角设置情况
Table 1 Multi-blade controllable otter board attack angle and blade rotation angle setting

实验组别 Experimental group	冲角 Angle of attack	转动的 叶片位置 Position of blade	叶片转角 Blade rotation angle
1	0°~45°	无	0°
2	0°	两端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°
3	0°	上端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°
4	0°	下端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°
5	20°	两端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°
6	20°	上端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°
7	20°	下端	40°、30°、20°、10°、 -40°、-30°、-20°、-10°

(0 Pa)。模型表面被认为是光滑且不移动条件, 且设定其他壁面具有自由滑动条件的光滑壁面。求解方法选择压力-速度耦合方法。通过二阶迎风方程对压力、动量、湍流动能和湍流耗散率进行了空间离散化^[27]。其收敛残差精度为 10^{-3} 。

1.3 水动力系数公式

网板水动力性能相关参数有雷诺数 Re 、升力系数 C_l 、阻力系数 C_d 、升阻比 K 、Z 轴分力系数 C_z 以及 X 轴力矩系数 C_{mx} , 计算公式为:

$$Re = \frac{vc\rho}{\mu} \quad (1)$$

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho sv^2} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho sv^2} \quad (3)$$

$$K = \frac{C_l}{C_d} \quad (4)$$

$$C_z = \frac{2F_z}{\rho sv^2} \quad (5)$$

$$C_{mx} = \frac{2M_x}{\rho bsv^2} \quad (6)$$

式中: v 为流速 ($m \cdot s^{-1}$); c 为网板翼弦 (m); ρ 为流体密度 ($kg \cdot m^{-3}$); μ 为流体动力黏性系数 ($kg \cdot ms^{-1}$); F_l 为升力 (N); F_d 为阻力 (N); F_z 为 Z 轴分力 (N); M_x 为 X 轴力矩 ($N \cdot m$); b 为网板翼展 (m)。

2 结果

2.1 叶片闭合时网板水动力系数

数值模拟结果如图 4 所示, 1 号组模型的阻力系数随冲角的增大而上升。升力系数随冲角的增大出现先上升后下降的趋势, 并在 20° 冲角时达到最高值 0.88, 随后下降, 在 45° 冲角时与阻力系数接近。升阻比方面, 该状态下网板的升阻比最大值为 8.85, 冲角为 5°, 随后冲角继续增大, 升阻比下降明显, 在 45° 冲角时仅为 1.02。网板在 Z 轴方向上的分力系数受冲角变化的影响较小, 在 20° 冲角时, 该力方向与 Z 轴负半轴方向一致, 系数仅为 1.85×10^{-3} 。同样, X 轴的力矩系数受冲角变化影响也较小, 最大值在 15° 冲角时出现, 为 1.03×10^{-3} 。

2.2 叶片打开时网板水动力系数

2.2.1 0° 冲角下叶片转动对网板水动力特性的影响

2 号、3 号、4 号组模型仿真结果如图 5 所示, 2 号组叶片朝正反两方向转动均会导致网板的阻力系数上升, 且朝正方向转动时影响更大。而

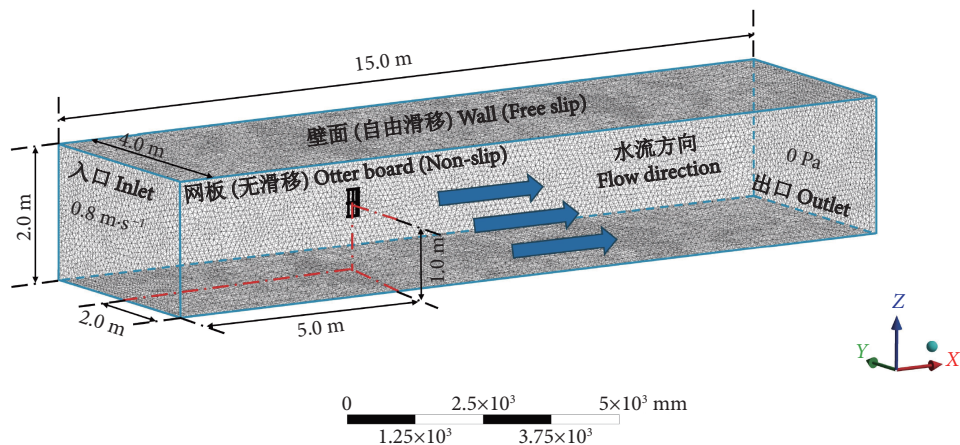


图2 计算域

Fig. 2 Domain of calculation

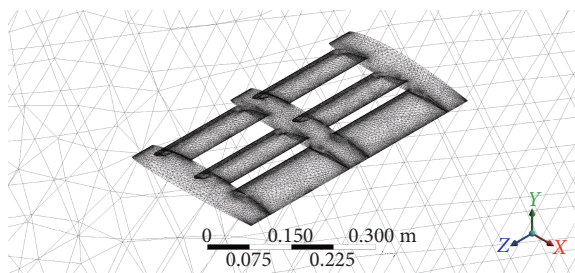
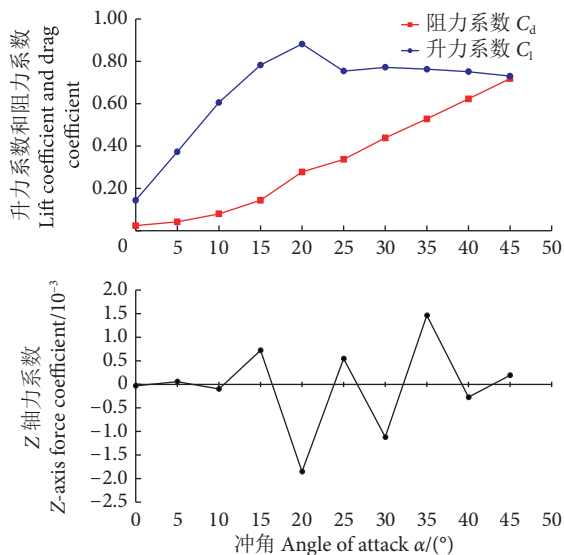


图3 网板网格划分

Fig. 3 Grids around otter board



3 号和 4 号组的阻力系数均低于 2 号组；此外，3 组模型实验结果均显示，与负方向对比，叶片朝正方向转动时，阻力系数上升更快。

升力系数方面，2 号组叶片转动对升力系数的影响高于 3 号和 4 号组。3 组模型叶片朝正方向转动时，升力系数先增加后减小，均在 $\theta=20^\circ$ 时达到升力系数最大值；叶片朝负方向转动时，升力系数均逐渐下降，且 2 号组模型的叶片转动到 -20°

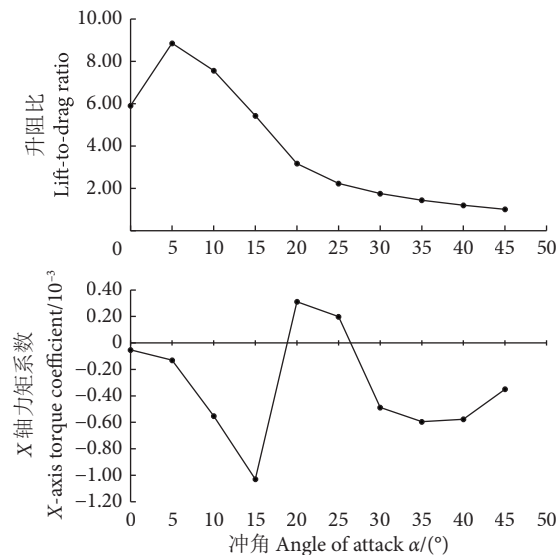
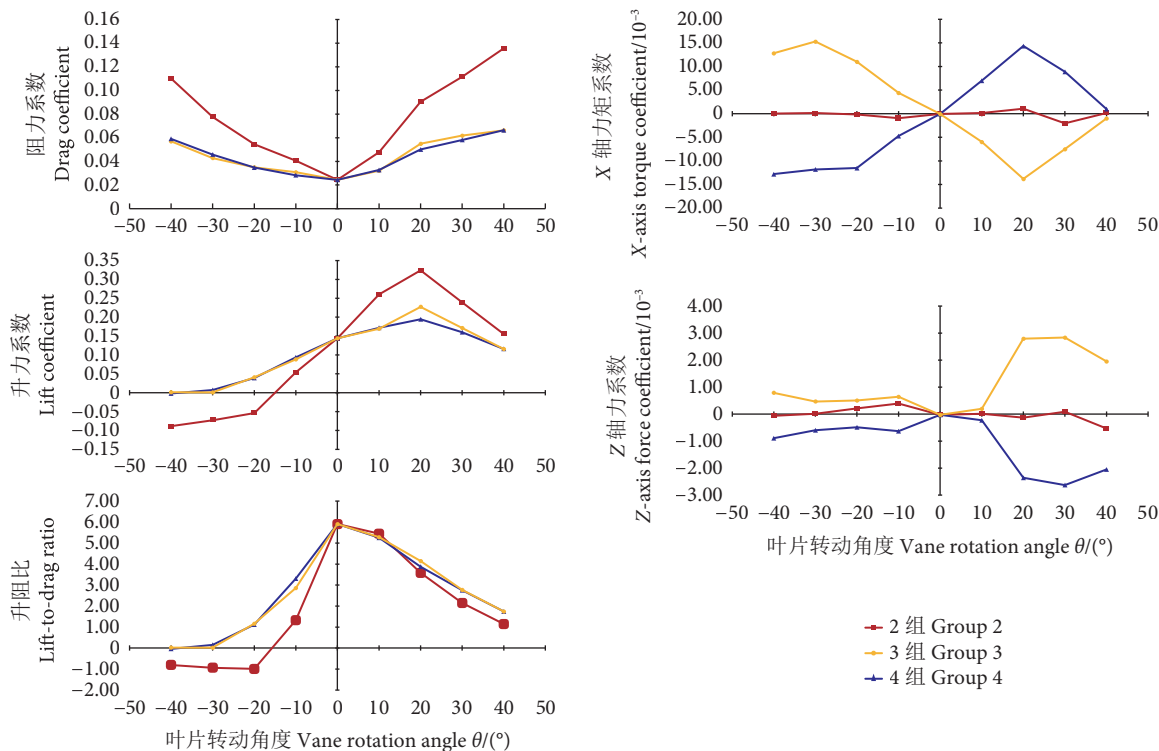


图4 叶片闭合时网板水动力系数

Fig. 4 Hydrodynamic coefficient of otter board when blades were closed

图5 0° 冲角下叶片转角对网板水动力特性的影响Fig. 5 Influence of blade rotation angle of 0° attack angle on hydrodynamic characteristics otter board

时, 升力方向转为收缩方向, 增加叶片转角, 收缩趋势增加, 而 3 号和 4 号组的升力系数逐渐趋于 0。

升阻比方面, 2 号组模型的叶片向两个方向转动均会导致网板的升阻比下降, 且叶片朝负方向转动, 升阻比下降明显; 当 2 号组两端叶片转角达到 -20° 时, 升力方向改变, 升阻比为 -0.99 , 随后转角增大, 升阻比下降。当 $\theta=40^\circ$ 时, 3 号和 4 号组的升阻比为 1.74, 2 号组的升阻比为 1.14。

X 轴的力矩方面, 2 号组的旋转力矩绕 0 值波动, 变化幅值小, 在 $\theta=30^\circ$ 时, C_{mx} 仅为 -2.04×10^{-3} 。当 3 号组模型叶片朝负方向转动时, 该力矩系数先增加后减小, 在 $\theta=-30^\circ$ 时, C_{mx} 为 1.53×10^{-2} ; 当 3 号组模型叶片朝正方向转动时, 力矩系数同样先增加后减小, 在 $\theta=20^\circ$ 时, $C_{mx}=1.38 \times 10^{-2}$ 。4 号组模型叶片朝负方向转动时, 该力矩系数不断增加, 在 $\theta=-40^\circ$ 时, $C_{mx}=1.53 \times 10^{-2}$; 当 4 号组模型叶片朝正方向转动时, 力矩系数先增后减, 在 $\theta=20^\circ$ 时, $C_{mx}=1.43 \times 10^{-2}$ 。

Z 方向上的分力变化情况, 2 号组模型 Z 方向上的分力绕 0 上下波动, $\theta=40^\circ$ 时, 该系数仅为 5.3×10^{-4} , 且力的方向与 Z 轴负方向一致。当 3 号组叶片朝负方向转动时, Z 轴上的分力方向与 Z 轴正方向一致, 力的系数均未超过 8.0×10^{-4} ; 当 4 号组叶片朝正方向转动时, 分力方向不改变, 分力系数先增加后缓慢下降, 在 $\theta=30^\circ$ 时达到最大值 2.83×10^{-3} 。当 4 号组叶片朝负方向转动时, Z 轴上的分力方向与 Z 轴负方向一致, 力的系数未超过 9.0×10^{-4} ; 当 4 号组叶片朝正方向转动时, 分力方向不改变, 分力系数先增加后缓慢下降, 在 $\theta=30^\circ$ 时达到最大值 2.63×10^{-3} 。

2.2.2 20° 冲角下叶片转动对网板水动力特性的影响

多叶可控网板整体的升力系数在 20° 冲角下达到最大, 该冲角下叶片转动对网板水动力性能的影响分析如图 6。

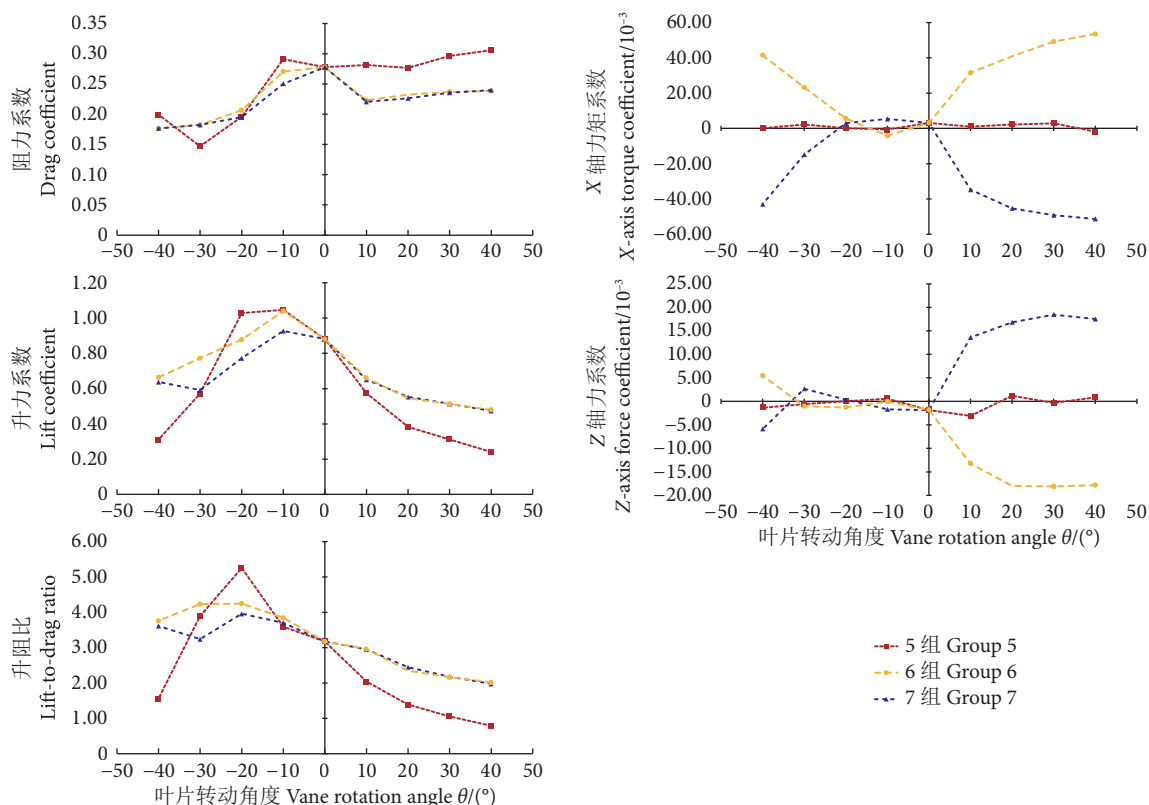


图6 20° 冲角下叶片转角对网板水动力特性的影响

Fig. 6 Influence of blade rotation angle of 20° attack angle on hydrodynamic characteristics otter board

首先, 当网板的冲角增加至 20° 时, 叶片转动后的阻力系数也增大。5 号组模型网板的阻力系数先下降后上升, 在 $\theta=-30^\circ$ 时, $C_d=0.147$; 叶片朝正方向转动, 阻力系数缓慢上升。6 号和 7 号组的趋势

相近, 叶片朝正、负方向均会导致阻力系数下降。

其次, 升力系数方面, 叶片朝负方向转动时, 5 号、6 号、7 号 3 组模型的升力系数均先上升后下降, 最大升力系数均出现在 $\theta=-10^\circ$ 时, 其中

5号组的最大升力系数为1.05, 6号和7号组分别为1.04和0.93。而当这3组模型的叶片朝正方向转动, 升力系数均出现下降。

升阻比方面, 该冲角下, 叶片朝正方向转动后的升阻比均低于 0° 冲角时对应叶片转角下的升阻比。而当3组模型的叶片朝负方向转动超过 10° 时, 5号、6号、7号3组模型的升阻比反超2号、3号、4号组模型, 并在 $\theta=-20^\circ$ 时, 达到最大升阻比, 分别为5.25、4.25、3.96。

最后X轴力矩方面, 5号组的力矩系数围绕0值波动范围小。6号和7号组的叶片朝负方向转动时, 力矩系数变化幅度小, 均在 $\theta=-40^\circ$ 时, 力矩改变方向; 叶片朝正方向转动时, 6号与7号组的力矩方向相反, 但均随转角的增大而变大。

Z轴方向上的分力变化情况显示, 20° 冲角下6号与7号组的叶片朝负方向转动, 转角增大, 分离系数绕0值波动, 当 $\theta=-40^\circ$ 时, 分力改变方

向。6号组模型叶片朝正方向转动, 转角增大, 分力方向与Z轴负半轴方向一致, 且系数继续增大, 当叶片朝正方向转动角度超过 20° 后, Z轴上分力系数逐渐平稳; 7号组该系数的变化形式与6号组相似, 分力方向相反。

2.3 多叶可控网板压力流场分布及对比

2.3.1 1号组网板模型压力流场分布及对比

1号组在 0° 冲角下的压力流场显示, 3组叶片的前缘上部的正压区, 越靠近前端的叶片面积越大, 压力也越大; 当冲角增大到 20° 时, 网板的凸面正压区转移至另一侧, 同时凸面形成面积较大的负压区, 从前中后依次向后, 负压区的面积逐渐减小, 涡流脱落位置靠近前叶, 正压区主要集中在叶片的凹面中央, 其中前叶的压力区域最集中; 当冲角继续增大到 30° 时, 负压区中心向后移动, 负压区逐渐均匀分布至网板凸面, 涡流脱落位置靠后, 另一侧凹面的正压区持续增长(图7)。

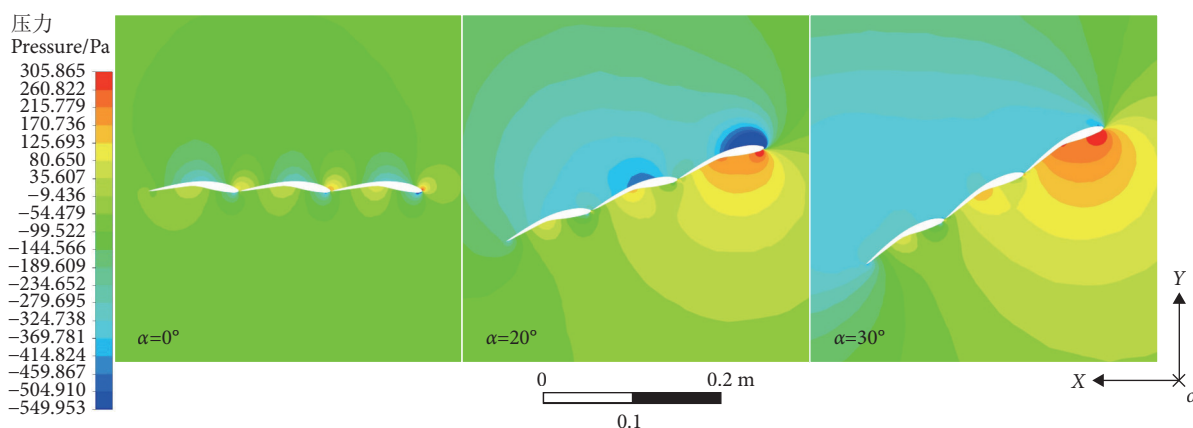


图7 1号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 7 Pressure flow field of Group 1 on center surface of otter board model

2.3.2 2号组网板模型压力流场分布及对比

2号组的上、下两端前叶和中叶朝正方向旋转 10° , 中叶与固定襟翼凸面前缘生成正压区, 且固定襟翼正压区压力区域大于中叶, 压力数值更高(图8)。叶片间的水流通过受阻; 叶片转角继续增加, 前叶凹面正压区域面积增加, 压力增大, 背部负压区域面积增加, 压力减小; 当叶片转角超过 30° 时, 前叶背部的负压尾流覆盖中叶与固定襟翼区域。叶片朝负方向转动, 3组叶片的凸面前缘产生正压区, 且随转角增大, 前叶正压区域面积与压力数值继续增大, 中叶与固定襟翼的正压区逐渐减小至消失; 冲角增大至 -30° 时, 叶片间隙的流速增加, 该状态下, 所有叶片开合, 网板间隙增大, 流速加快, 网板出现向收缩方向运动的趋势, 与系

数结果一致。

2.3.3 3号和4号组网板模型压力流场分布及对比

3号组叶片朝正方向旋转 10° , 前叶凹面, 中叶以及固定襟翼的凸面前缘产生正压区, 前缘背部产生负压区; 随转角增大, 前叶背部的负压区域面积逐渐覆盖尾部区域, 固定襟翼的前缘正压区面积先变大后减小至消失。叶片朝负方向转动, 3组叶片均在背部前缘以及凹面尾部出现正压区, 随转角增大, 前叶正压区持续扩大, 前叶负压区的影响范围覆盖后者(图9); 此状态下, 上端叶片开合, 网板间隙增大, 流速加快, 上端叶片周围压力减小, 而另一端叶片未转动, 周围流体压力大于上端, 网板产生Z轴向上的分力, 与系数结果一致。

4号组网板模型压力流场分布与3号组大致相

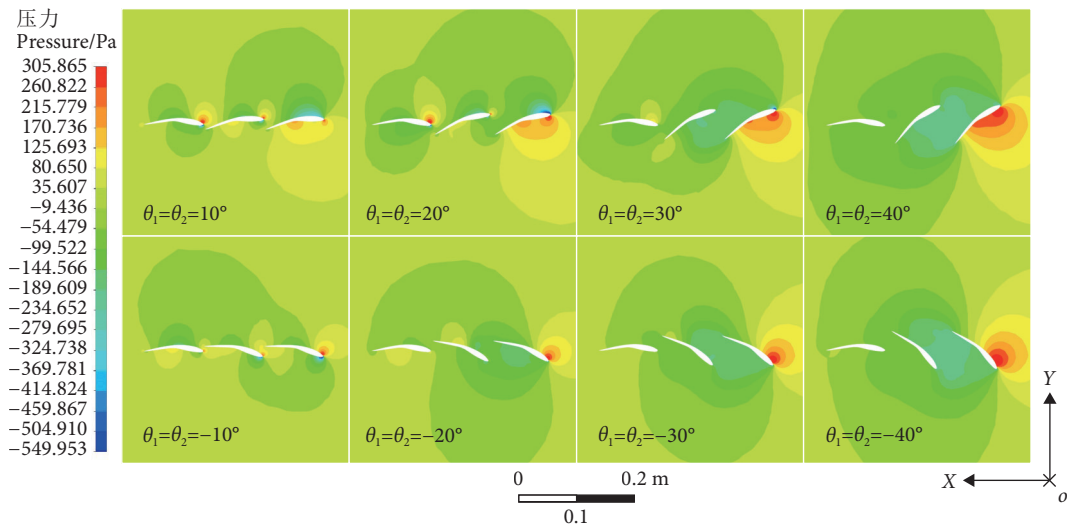


图8 2号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 8 Pressure flow field of Group 2 on center surface of otter board model

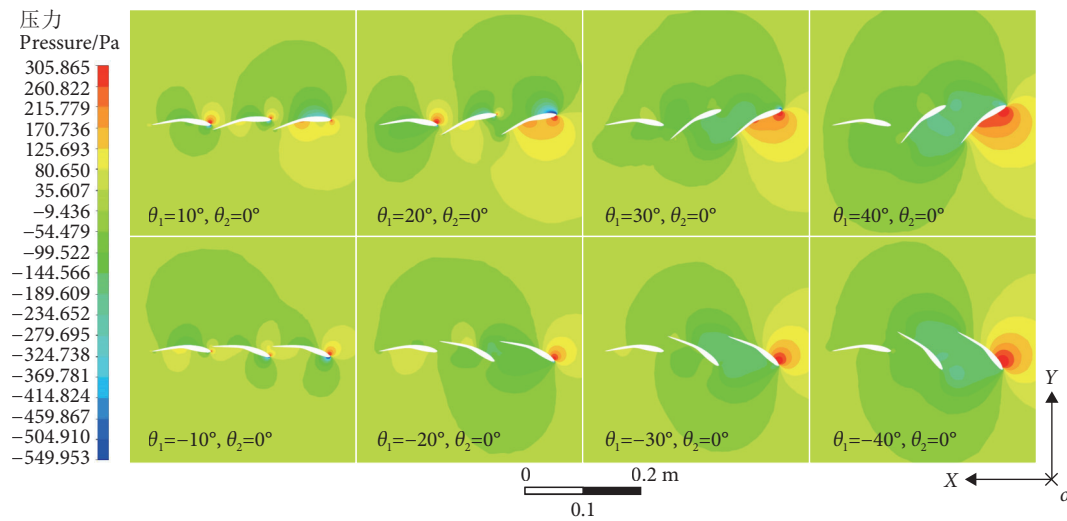


图9 3号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 9 Pressure flow field of Group 3 on center surface of otter board model

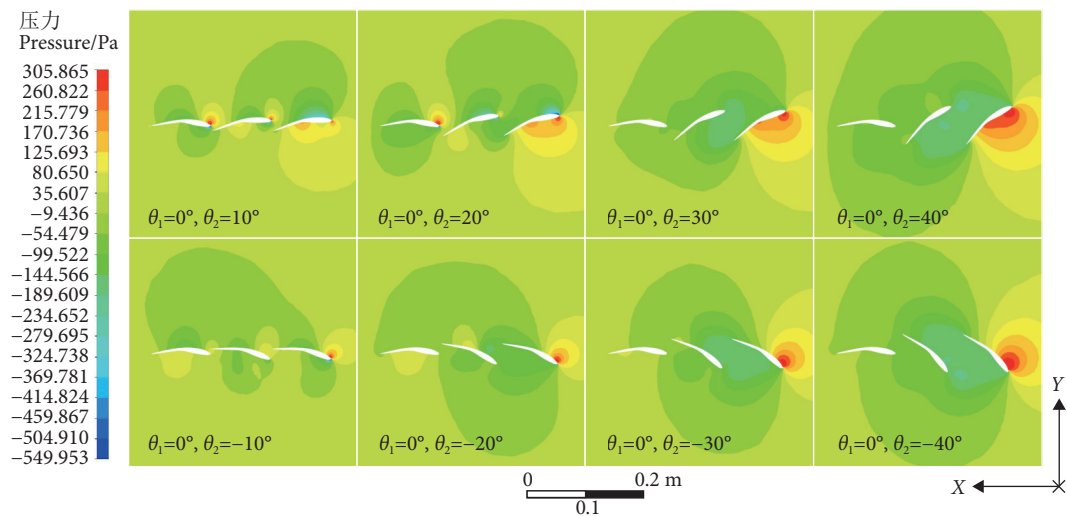


图10 4号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 10 Pressure flow field of Group 4 on center surface of otter board model

同,但由于开合叶片位置呈对称关系,因此,叶片朝负方向转动,下端叶片周围压力减小,4号组模型产生Z轴向下的分力,与系数结果一致(图10)。

2.3.4 5号组网板模型压力流场分布及对比

20°冲角下,5号组模型叶片朝正方向旋转10°,前叶、中叶以及固定襟翼凹面产生的正压区依次减小;与0°冲角下的压力流场相比,20°冲角下叶片间的水流速度减小(图11)。叶片转角增加,前叶凹面正压区域面积增加,压力增大,背部

负压区域面积增加,压力减小;当叶片转角超过30°,前叶背部的负压尾流覆盖中叶与固定襟翼区域。叶片朝负方向转动,3组叶片的凸面前缘产生负压区,且随转角增大,前叶与中叶的负压区压力逐渐上升并转变为正压区;而固定襟翼的凹面正压区压强随叶片转角增大不断增加。冲角增大至-30°时,叶片间隙的流速增加,前叶凸面产生的正压区与固定襟翼凹面的正压区共同导致阻力上升,与系数结果一致。

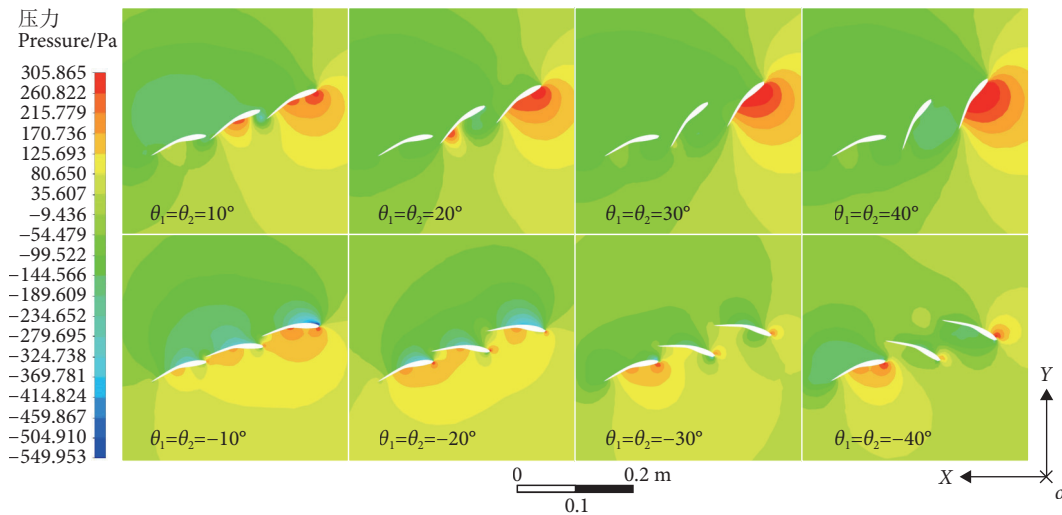


图11 5号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 11 Pressure flow field of Group 5 on center surface of otter board model

2.3.5 6号组和7号组网板模型压力流场分布及对比

6号组叶片朝正方向旋转10°,前叶凹面,中叶以及固定襟翼的凸面前缘均产生正压区;随着转角继续增大,中叶的正压区由凹面中央向尾部转移,最终脱落消失。叶片朝负方向转动,3组叶片均在背部前缘以及凹面尾部出现负压区,随着转角的增大,前叶负压区的压力数值不断增大(图12);此状态下,上端叶片开合方向与叶片转动方向相反,上端叶片周围压力增大,而另一端叶片未转动,周围流体压力小于上端,网板产生Z轴向下的分力,与系数结果一致。

7号组网板模型压力流场分布与6号组大致相同,但由于开合叶片位置呈对称关系,因此,当叶片朝负方向转动,下端叶片周围压力减小,7号组模型产生Z轴向下的分力,与系数结果一致(图13)。

3 讨论

3.1 网板控制策略设计

目前,网板研究的主要热点方向是增强水动力

性能,进而提高经济效益。自数值仿真和水槽渔具模型实验等技术手段的兴起与应用以来,对传统形态的网板,如矩形网板、椭圆型网板、双曲面网板以及立式V形曲面网板等,在结构上的调整优化已经非常充分^[28]。在降低网板阻力系数的研究上,Zhuang等^[29]通过在双曲面网板面板展向上开缝,有效降低了网板的阻力系数。Leifsson等^[30]基于局部代理模型,模拟网板调整多个结构参数以优化水动力的行为,减少了计算次数,并达到设计效果。Lee等^[24]也曾尝试利用疏水材料覆盖网板表面,实验发现网板的阻力下降了21.3%。对于扩张力的提升研究,Shen等^[31]在立式曲面网板基础上设计的带翼端板的高升力网板,发现弯曲度为25%,0.10倍翼弦宽度的翼端板的模型升力系数达到2.48。You等^[32]在此基础上设计了双叶型高升力网板,在22°冲角下,最大升力系数为1.78,提高升力的同时不失稳定性。而学者们以增大拖网网口扩张程度为研究目的,在提高捕捞效率的同时往往也带来新的问题。无法调节扩张力的网口,除了增加

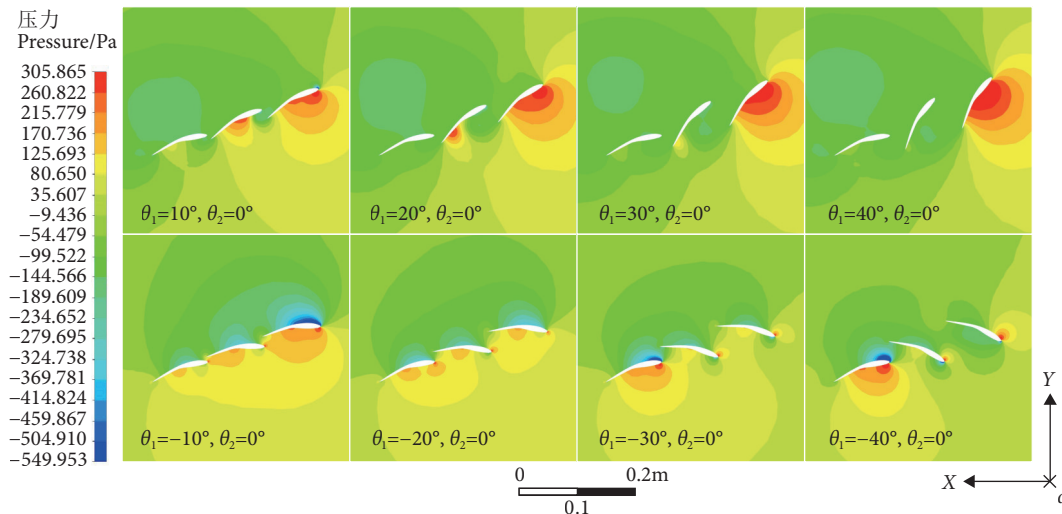


图12 6号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 12 Pressure flow field of Group 6 on center surface of otter board model

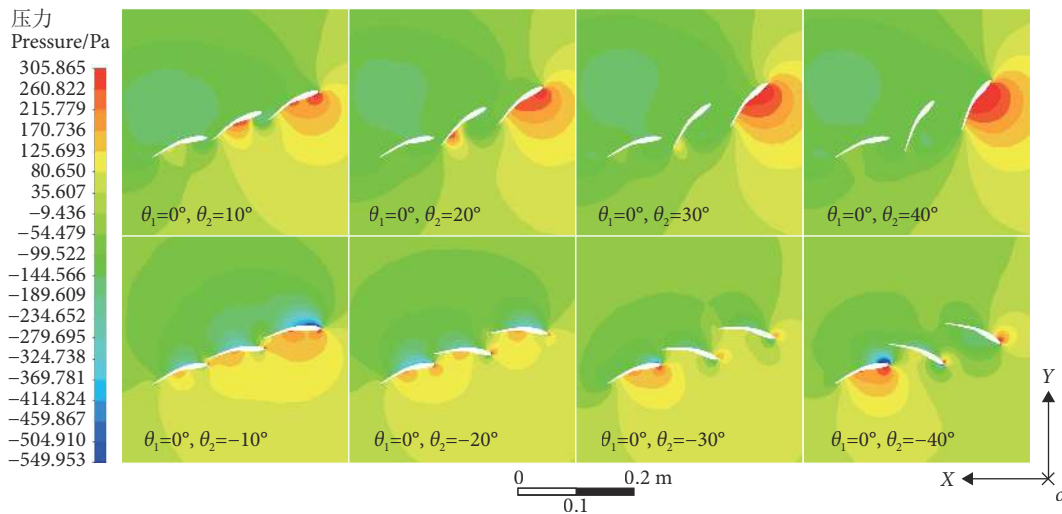


图13 7号组网板模型中心面压力流场分布

Fig. 13 Pressure flow field of Group 7 on center surface of otter board model

兼捕, 误捕的风险, 在收网和放网两个阶段中, 扩大网口也意味着拖网需要过滤更多水体, 增加阻力和网具的磨损消耗。同时对于拖网捕捞过程中, 释放的曳纲长度往往是固定的, 且作业过程中几乎不会调整曳纲、手纲与网板的固结点位置, 因此传统网板在拖网系统沉浮状态中只扮演配重的角色, 增加下沉速度和深度, 无法提供上升的力^[33]。

此外, Sala 等^[34]设计的 Clark-Y 型网板的升阻比为 3.6, 优于母型矩形 V 形网板, 并进行了海上测试。而黄小双等^[35]和孔祥洪等^[36]基于美国国家航空咨询委员会 (National advisory committee for aeronautics, NACA) 翼型设计的低阻力仿生江豚为水下渔具设计提供了新的思路。本研究, 与传统网板姿态控制策略不同^[37], 多叶可控网板以不改

变纲缆与网板的固结点为前提, 通过组合转动叶片的位置和转动角度实现对网口状态的调整。多叶可控网板的 P50-3 翼型剖面具有良好的流体形状优势, 在不同的叶片状态下均能表现出一定水动力性能。可针对作业流程和目标渔获的特点, 为拖网提供如图 14 所示的, 包括扩张、收缩、上升以及下沉 4 种控制状态^[24]。当网口深度达到捕捞水层而处于待扩张状态, 以 20° 冲角下的多叶可控网板为例, 此时可设定两端叶片朝负方向转动 10°, 以达到增加网板扩张力, 增大网口扩张范围。在目标鱼完全进入网口后, 继续保持扩口扩张程度会增加燃油的消耗, 此时拖网处于待收缩状态, 可继续增加叶片在负方向上的转角以降低阻力系数和升力系数, 达到减小阻力和收缩网口的效果, 减少渔获逃

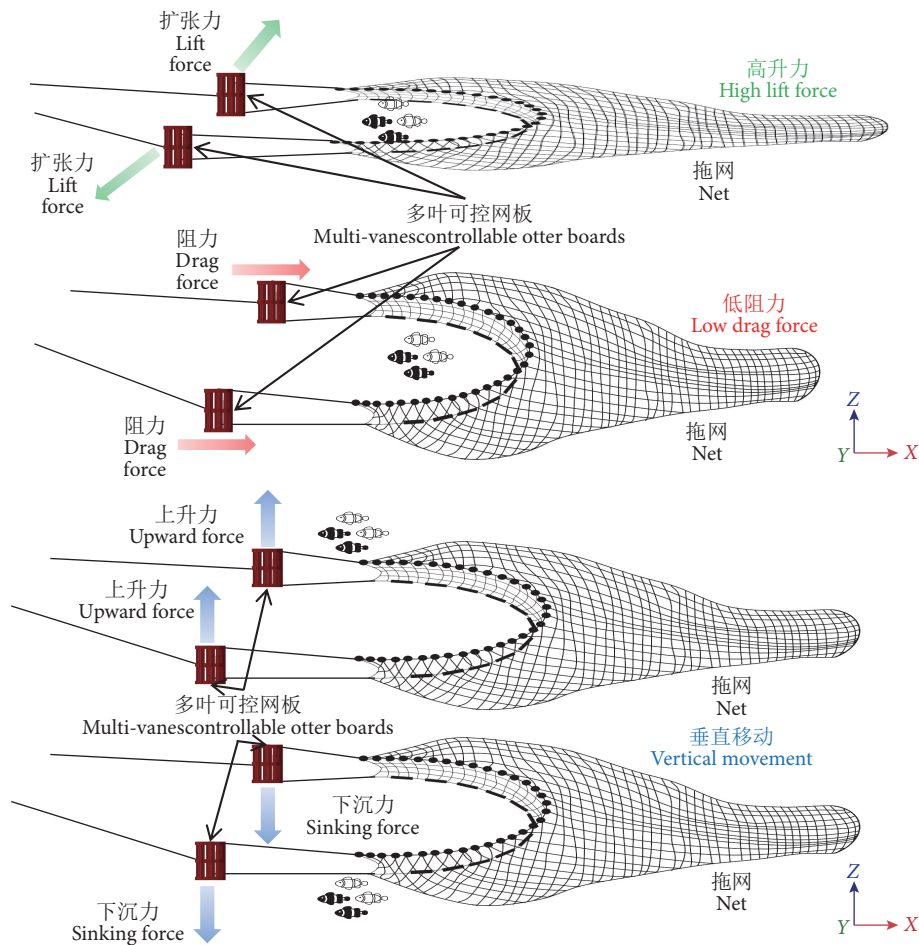


图14 网板对拖网的控制策略

Fig. 14 Control strategy of otter board to trawl

逸,提升捕捞效率。当网口扩张程度足够大,而作业水层需要调整时,拖网处于待上升或待下沉状态,可按6号和7号组模型状态设定叶片转角,以实现拖网上浮和下沉的运动控制。

3.2 不足之处

本研究设计的多叶可控网板,是对网板调整自身结构以改变水动力的初步探索。不同于传统网板调整姿态的方式,多叶可控网板在不改变结固点的前提下,通过两端叶片的转动以达到运动趋势的变化。在这个过程中,对于叶片转动方向的分析讨论是其他可变翼襟网板研究中所欠缺的^[38];值得一提的是,不同冲角下,叶片受水流作用的部位也有所改变,本实验结果显示两组冲角下,相同叶片转角对网板的水动力影响有较大差异,而对于更多不同冲角下的状态分析是本研究没有涉及到的,后续研究中应加入更多组冲角以拓展分析广度,还应加入用户自定义程序(User defined functions, UDF)以分析叶片转动的动态变化过程以揭示水动力变化形势^[30]。此外,本研究对于网板控制网口扩张程度

与捕捞深度的探讨只基于网板自身的运动趋势,暂未加入曳纲与手纲对其作用关系分析,实际情况应更为复杂,后续的研究将加入水槽实验,进一步测试,并合理规划控制策略。

4 结论与展望

本研究通过数值模拟仿真,利用翼型的流体优势^[39-40],设计了多叶可控网板,对其水动力性能相关参数进行了计算分析,将其周围压力流场进行可视化,并探究了多叶可控网板对网口状态的控制策略的可行性。主要结论如下:

1) 1号组模型在 20° 冲角下出现最大升力系数0.88,最大升阻比出现在 5° 冲角时,为8.85;并且该状态下网板在竖直方向上的分力和X轴的旋转力矩受冲角影响程度小。

2) 2号、3号和4号组网板模型叶片朝负方向转动会导致升力系数减小,叶片朝正方向转动,升力系数先增后减,在 20° 冲角时达到最大值0.32;网板叶片朝正方向转动,3号组网板模型会产生竖

直向上的分力, 4 号组网板模型则产生竖直向下的分力。

3) 与 0° 冲角状态下不同, 5 号、6 号和 7 号组网板模型叶片朝正方向转动会导致网板升力不断减小, 叶片朝负方向转动, 升力系数先增后减, 在 -10° 转角时达到最大值 1.05; 网板叶片朝正方向转动, 6 号组网板会产生竖直向下的分力, 7 号组网板会产生竖直向上的分力。

4) 20° 冲角下, 多叶可控网板的叶片朝负方向转动, 不仅能够减小阻力系数, 一定范围内还能提高升力系数, 有效提升网板的升阻比; 上端或者下端叶片朝正方向转动, 网板能够获得垂直方向上的运动趋势, 以达到调整作业水层的目的。

多叶可控网板的设计思路符合现代捕捞装备智能化的发展方向。根据作业阶段特征改变阻力和扩张力以有效降低渔船的燃油消耗; 垂直方向上的移动控制不但能够提高捕捞的概率和效率, 更能在关键时刻避免拖网系统对海底的接触。因此, 本研究通过改善拖网网板的生态友好性, 有利于远洋渔业经济和环境的可持续发展。

参考文献:

- [1] 许柳雄. 渔具理论与设计学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 132-148.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 40-74.
- [3] SHAN C X, TANG H, THIERRY N N B, et al. Sinking behavior of netting panels made with various twine materials, solidity ratios, knot types, and headline weights in flume tank[J]. *J Mar Sci Eng*, 2023, 11(10): 1972-1986.
- [4] 郭根喜, 刘同渝, 黄小华, 等. 拖网网板动力学理论研究与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2008: 254-261.
- [5] 朱一舟. 翼型分水板的水动力性能分析及型线优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 55-68.
- [6] 孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 93-100.
- [7] 庄鑫, 邢彬彬, 许传才, 等. 网板水动力性能研究综述[J]. 渔业现代化, 2015, 42(5): 63-68.
- [8] LIU J, HUANG H L, LI L Z, et al. Hydrodynamic characteristics of the oval cambered double slotted otter board in bottom trawl fisheries[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2017, 77: 012012-012021.
- [9] 刘志强. 中层网板水动力性能及流场可视化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 23-32.
- [10] 庄鑫. 高升力双叶型网板的开发研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015: 35-44.
- [11] XU Q C, HUANG L Y, ZHAO F F, et al. Effects of aspect ratio on the hydrodynamic performance of full-scale rectangular otter board: numerical simulation study[J]. *Ocean Engin*, 2017, 142: 338-347.
- [12] CHU W H, GUO H Q, ZHANG H Z, et al. Effect of structural parameters on the hydrodynamic performance of vertical curved V-type otter board[J]. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.02.004>.
- [13] FUKUDA K, HU F X, TOKAI T, et al. Effects of aspect and camber ratios on hydrodynamic characteristics of biplane-type otter board[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1999, 65(5): 860-865.
- [14] 王明彦, 王锦浩, 张勋, 等. 立式 V 型曲面网板的水动力性能[J]. 水产学报, 2004, 28(3): 311-315.
- [15] 刘健, 黄洪亮, 吴越, 等. 2 种立式曲面缝翼式网板水动力学性能的试验研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(1): 68-74.
- [16] 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.
- [17] 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]. *Fish Sci*, 2017, 83(2): 181-190.
- [18] XU Q C, FENG C L, HUANG L Y, et al. Parameter optimization of a double-deflector rectangular cambered otter board: numerical simulation study[J]. *Ocean Engin*, 2018, 162: 108-116.
- [19] TAKAHASHI Y, FUJIMORI Y, HU F X, et al. Design of trawl otter boards using computational fluid dynamics[J]. *Fish Res*, 2015, 161: 400-407.
- [20] YOU X X, HU F X, ZHUANG X, et al. Effect of wingtip flow on hydrodynamic characteristics of cambered otter board[J]. *Ocean Engin*, 2021, 222: 108611-108625.
- [21] 庄鑫, 邢彬彬, 许传才, 等. 网板周围流态的可视化研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(2): 237-242.
- [22] LIU J, HUANG H L, CHEN S. Effect of aspect ratio on hydrodynamic performance of high lift otter board in trawl fisheries[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2018, 153: 032034-032043.
- [23] WANG L, ZHANG X, WAN R, et al. Optimization of the hydrodynamic performance of a double-vane otter board based on orthogonal experiments[J]. *J Mar Sci Eng*, 2022, 10(9): 1177-1191.
- [24] LEE J, YOON H, PARK Y, et al. Design and fabrication of fluid flow characteristic controllable trawl door using a trailing edge flap[J]. *J Mech Sci Technol*, 2019, 33(12): 5623-5630.
- [25] WANG G, HUANG L, WANG L Y, et al. A metamodeling with CFD method for hydrodynamic optimisations of deflectors on a multi-wing trawl door[J]. *Ocean Engin*, 2021, 232: 109045-109059.
- [26] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. *Comput Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.
- [27] LI Y Y, WANG G, XU Q C, et al. Study of the influence of aspect ratios on hydrodynamic performance of a symmetrical elliptic ot-

- ter board[J]. *Symmetry*, 2022, 14(8): 1566-1581.
- [28] 陈刚. 拖网网板力学性能研究及结构优化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 2-4.
- [29] ZHUANG X, YOU X X, KUMAZAWA T, et al. Effect of spanwise slit on hydrodynamic characteristics of biplane hyper-lift trawl door[J]. *Ocean Engin*, 2022, 249: 1-14.
- [30] LEIFSSON L, HERMANNSSON E, KOZIEL S. Optimal shape design of multi-element trawl-doors using local surrogate models [J]. *J Comput Sci-Neth*, 2015, 10: 55-62.
- [31] SHEN X L, HU F X, KUMAZAWA T, et al. Hydrodynamic characteristics of a hyper-lift otter board with wing-end plates[J]. *Fish Sci*, 2015, 81(3): 433-442.
- [32] YOU X X, HU F X, KUMAZAWA T, et al. Hydrodynamic performance of a newly designed biplane-type hyper-lift trawl door for otter trawling[J]. *Appl Ocean Res*, 2020, 104: 1-11.
- [33] SISTIAGA M, HERRMANN B, GRIMALDO E, et al. Effect of lifting the sweeps on bottom trawling catch efficiency: a study based on the Northeast arctic cod (*Gadus morhua*) trawl fishery[J]. *Fish Res*, 2015, 167: 164-173.
- [34] SALA A, FARRAN J D A P, ANTONIJUAN J, et al. Performance and impact on the seabed of an existing- and an experimental-otterboard: comparison between model testing and full-scale sea trials[J]. *Fish Res*, 2009, 100(2): 156-166.
- [35] 黄小双, 孙翁杰, 王静峰, 等. 仿生鱿鱼俯仰姿态下水动力学数值模拟[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 252-260.
- [36] 孔祥洪, 黄小双, 刘帆, 等. 基于仿生江豚鱼群共融型装置的设计与实现[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(5): 18-25.
- [37] 刘景彬, 唐浩, 许柳雄, 等. 倾斜状态对 V 形网板水动力和周围流场特征的影响[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(5): 755-769.
- [38] EIGHANI M, VEIGA-MALTA T, O'NEILL F G. Hydrodynamic performance of semi-pelagic self-adjusting otter boards in demersal trawl fisheries[J]. *Ocean Engin*, 2023, 272: 113877-113889.
- [39] YAN H, SU X Z, ZHANG H Z, et al. Design approach and hydrodynamic characteristics of a novel bionic airfoil[J]. *Ocean Engin*, 2020, 216: 108076-108086.
- [40] 令狐克骑. 仿鲨鱼皮表面结构对翼型水动力性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 23-46.