



立式双曲面网板水动力性能及流场可视化研究

刘志强¹, 许柳雄^{1,2,3}, 唐浩^{1,2,3*}, 胡夫祥⁴, 周成¹, 陈明鑫¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 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;

4. 东京海洋大学, 日本 108-8477)

摘要: 网板是拖网作业系统中重要的属具之一, 其水动力性能的优劣直接关系到拖网网口的扩张, 并影响其生产效果和经济效益。采用单因素试验法, 利用水槽模型试验和数值模拟 (computational fluid dynamics, CFD) 研究立式双曲面模型网板在不同展弦比 λ (2.5、3.0、3.5、4.0)、弯曲度 f/C (10%、15%、20%)、后退角 A (0° 、 10° 、 15°) 下的水动力性能, 分析不同结构参数的网板水动力性能, 对比两种方法的结果, 并实现网板周围流场可视化。结果显示: ① 2号网板 ($\lambda=3.0$ 、 $f/C=15\%$ 、 $A=10^\circ$) 升力系数最大, 冲角 25° 时, 模型试验值为 1.70, 数值模拟值为 1.88, 阻力系数随冲角增大一直增大, 且后部流速的模拟值和测定值平均偏差为 4.40%, 两种方法获得的结果吻合度高。② 2号网板在流场分布中边界层分离点随冲角增大逐渐向翼端前沿移动, 中心面后部涡旋随冲角增大一直增大, 左翼板侧低压区随冲角增大呈先增大后减小趋势, 网板尾部随冲角增大形成明显的翼端涡, 产生涡升力对网板提供附加升力, 使得立式双曲面网板比其他类型网板有较高升力。

关键词: 立式双曲面网板; 水动力性能; 水槽试验; 数值模拟; 流场可视化

中图分类号: S 971

文献标志码: A

网板是单船拖网作业的主要属具, 主要作用为实现网具扩张、增加扫海面积^[1], 其水动力性能的优劣直接影响拖网作业的渔获性能和经济效益^[2]。因此, 开展网板水动力性能的研究备受国内外学者的关注。

网板的水动力可分解为与网板运动方向相垂直的扩张力和与网板运动方向相平行的水阻力, 升阻比则是衡量网板扩张效率的关键参数^[3]。自 19 世纪后期起, 随着世界各国单船拖网渔业的快速发展, 相继开发出矩形网板、椭圆形网板、V 形网板、立式 V 型曲面网板、圆盾形网板等类型网板^[4-5]。矩形平面网板使用最早, 结构简单, 易操作, 但水动力效率低^[6]。随后, 有

研究在传统矩形平面网板基础上研制出了矩形曲面网板, 水动力性能明显提高, 但缺点是造价高, 翻到后难复原^[7]。也有研究在矩形曲面网板的基础上增大了展弦比, 减小了诱导阻力, 改善升阻比, 研制出立式曲面网板^[2]。日本学者 Park 等曾采用不同曲面形状 (如机翼、圆弧形、非圆弧形) 对立式曲面网板的作业性能进行改进^[2], 但在实际使用过程中出现遇到障碍物会大角度改变拖向, 容易翻倒, 操作复杂等问题, 于 20 世纪 90 年代, 有研究者设计出双层曲面全钢结构的立式双曲面网板^[8], 不但改善了立式曲面网板的稳定性, 而且其最大升力系数达到 1.68^[9], 远高于其他类型网板。立式双曲面网板具有高

收稿日期: 2019-08-11 修回日期: 2019-12-28

资助项目: 国家自然科学基金 (31902426, 41806110); 农业农村部南极海洋生物资源开发利用项目 (D8002-17-0109); 上海市青年科技英才扬帆计划 (19YF1419800)

通信作者: 唐浩, E-mail: htang@shou.edu.cn

升力、稳定性好和结构小型化便于操作的优点, 已在日本东北部和北海道近海作业的大、中型拖网渔业中广泛应用。我国对网板水动力性能的研究起步较晚, 网板的结构形式单一^[10], 但近几年对网板的研究和新型网板的开发逐渐重视^[11-12]。网板结构参数是影响水动力性能的重要因素, Fukuda 等^[13]和 Park 等^[14]通过水槽试验发现, 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^[15]利用风洞试验得出, 影响立式 V 型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; Park 等^[16]水槽试验结果表明, 表层和底层拖网网板后退角分别为 20°和 10°时网板水动力性能最优。

水槽模型试验能够在可控条件下比较方便和准确地获取网板水动力性能参数, 现已成为设计和开发网板过程中不可缺少的标准程序。随着计算机技术的快速发展, 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 因具有省时省力, 研究内容灵活的优点, 已在流体研究领域得到广泛应用, 并已成为解决复杂物理问题的重要手段^[10]。一些渔业研究人员也在网板水动力性能研究方面应用计算流体力学方法^[17], Xu 等^[18]利用数值模拟分析矩形双开缝曲面网板水动力性能及网板周围流场分布, 发现水动力性能的数值模拟结果与模型试验结果吻合度较高。将模型试验和 CFD 数值模拟相结合, 进行网板水动力性能及流场可视化研究, 不仅使研究结果

相互辅佐与验证, 也可为今后网板的优化和开发提供技术支撑。

本实验利用水槽试验和 CFD 数值模拟方法, 研究展弦比、弯曲度、后退角等网板结构参数对立式双曲面网板水动力性能的影响, 并通过流场可视化, 分析不同冲角下网板周围流态的变化, 以获得某一特定网板在最优水动力性能下的结构参数, 为优化网板性能和设计新型网板提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 网板结构参数

立式双曲面网板模型及结构参数如图 1 所示, 其中 A 为后退角, f 为拱度, b 为翼展, C 为翼弦, θ 为交错角, α 为冲角, h/C 为翼弦间隔比, 展弦比 $\lambda=b/C$ 。模型尺度比为 1/10, 展弦比分别设置为 2.5、3.0、3.5 和 4.0, 弯曲度为 10%、15%和 20%, 后退角为 0°、10°和 15°, 交错角和翼弦间隔比分别为 30°和 0.9, 有关模型网板结构参数值如表 1 所示。

1.2 水槽试验

网板水动力性能测试在东京海洋大学循环水槽进行。水槽侧面观测部尺寸长 9 m, 宽 2.2 m, 水深 1.6 m。流速计为螺旋式, 东京计测技研株式会社生产, 流速测定范围 10~200 cm/s, 精度 2%。六分测力传感器为日本 Denshikogyo Co 生产, 量程 49 N, 精度 0.1%, 记录测量值为水流稳

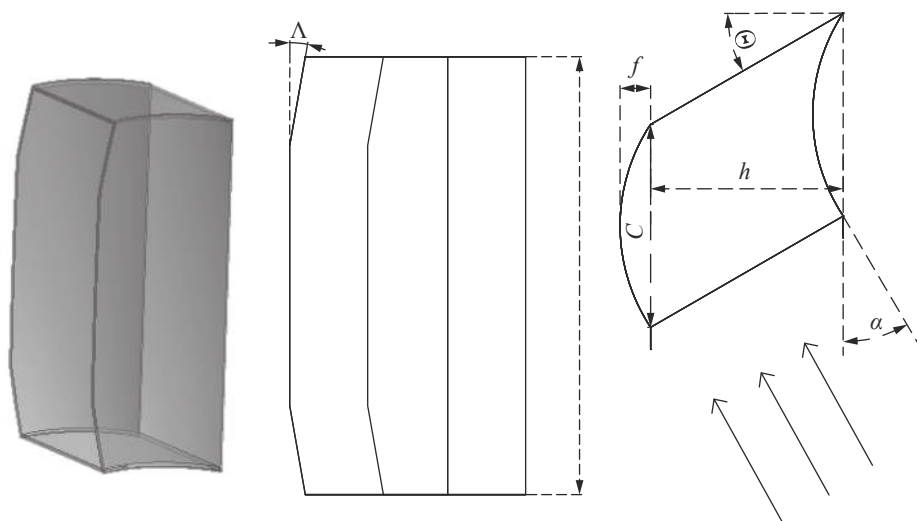


图 1 立式双曲面网板示意图

Fig. 1 Diagram of the hyperboloid otter board

表 1 各网板模型参数值

Tab. 1 Parameter values of testing otter board models

模型编号 no. models	翼弦: C/cm chord length	展弦比: λ aspect ratio	弯曲度: $f/C/\%$ camber ratio	后退角: $A/(\circ)$ sweepback angle	翼弦间隔比: h/C gap-chord ratio	交错角: $\theta/(\circ)$ Stagger angle
1	12.1	2.5	15	10	0.9	30
2	9.6	3.0	15	10	0.9	30
3	8.8	3.5	15	10	0.9	30
4	7.0	4.0	15	10	0.9	30
5	9.1	3.0	10	10	0.9	30
6	9.7	3.0	20	10	0.9	30
7	9.2	3.0	15	0	0.9	30
8	9.3	3.0	15	15	0.9	30

定状态下 20 s 内的平均值。试验时流速设置为 50~90 cm/s, 10 cm/s 为一个间隔。网板冲角为 0°~50°, 其中 0°~25°和 40°~50°以 5°为间隔, 25°~40°之间以 2°为间隔。试验时水温 9 °C, 水密度为 999.8 kg/m³。流速测定部位为网板中心面 (图 2), 1~4 测试点沿 Y 轴方向, 间隔为 9.6 cm; 5~8 测试点沿 Z 轴方向, 间隔为 4 cm; 9~11 测试点沿 X 轴方向, 间隔为 5 cm。

1.3 数值模拟

水槽试验显示水动力性能最优的模型网板将被选择为数值模拟的研究对象。数值模拟使用 ANSYS 15.0 软件中的 FLUENT 完成^[19]。模拟计算使用有限体积法对雷诺控制方程进行离散, 求解方法为 SIMPLE 算法; 湍流模型选用可实

现 k-ε 模型^[20](Realizable k-ε)。因立式双曲面网板为轴对称形状, 因此模拟计算区域可使用一半形状, 以节省大量计算时间。计算区域水槽长 2 m, 宽 1 m, 高 0.5 m, 网板前缘距水流入口 0.5 m, 网板中心轴距两侧壁面为 0.5 m(图 3)。

模拟计算过程中, 局部区域和网板周围网格全部划分为四面体网格, 最大网格尺寸为 20 mm, 最小网格为 0.33 mm(图 4)。网板周围边界层第一层网格厚度为 5×10^{-2} mm($y^+\approx1$), 通过从网板表面膨胀 15 层, 增长率为 1.2 来增强边界层网格密度。模拟计算区域总网格数和节点数分别为 1.90×10^6 和 4.90×10^5 。

计算区域边界条件设置如图 5 所示。水流密度为 999.8 kg/m³, 黏性系数为 1.34×10^{-4} kg/(m·s), 水流速度沿 Y 轴方向为 0.5 m/s, 湍流强度为 5%,

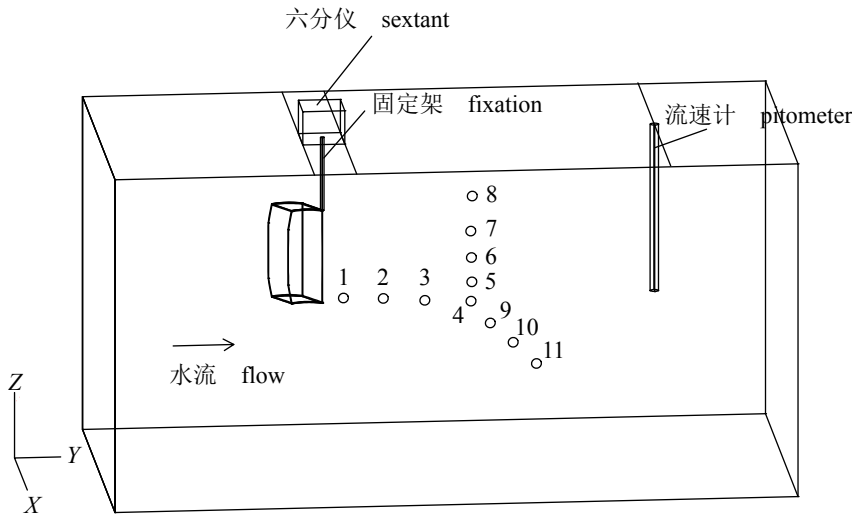


图 2 模型网板在动水槽中的安装位置及测试点分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the installation position and measurement point distribution of the testing model otter board in the experiment flume tank

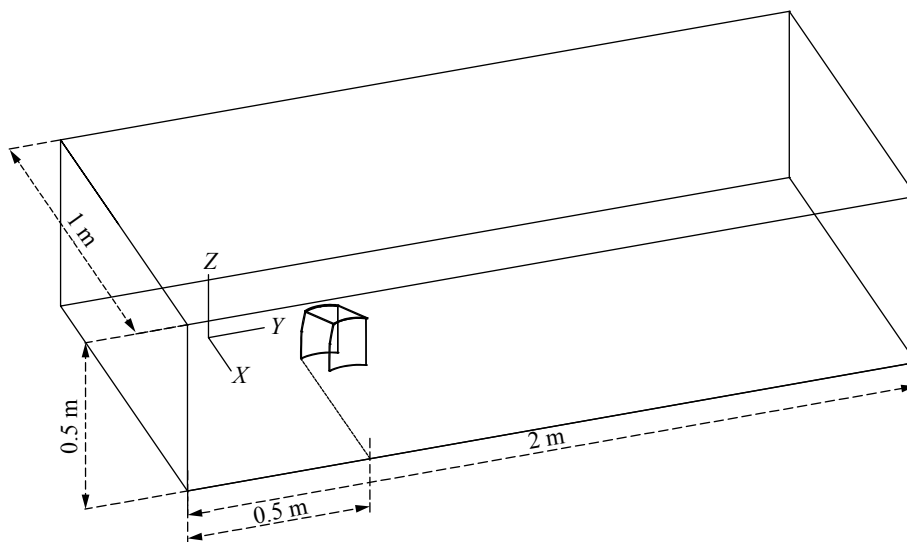


图 3 模拟计算区域

Fig. 3 Domain of the simulation calculation

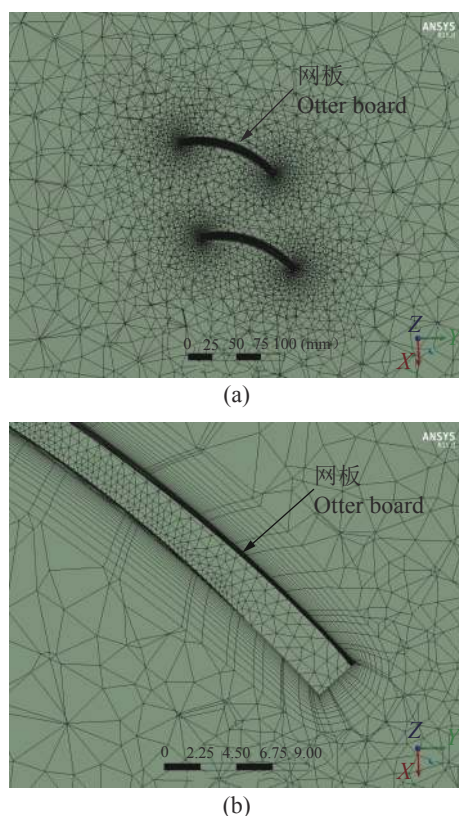


图 4 网板冲角 25°时的网格划分

(a) 局部网格, (b) 网板周围网格

Fig. 4 Computational grid partitions at the angle of attack of 25° ($\alpha=25^\circ$)

(a) local grids, (b) grids around the otter board

湍流黏性率为 10。压力出口设置 0 Pa, 底层壁面设置为对称, 网板壁面和水槽墙面全部设置

为固定无滑移条件。

1.4 相关参数定义

网板水动力参数定义 描述网板水动力特性的参数主要有雷诺数 Re , 升力系数 C_d , 阻力系数 C_L , 升阻比 K , 纵向力矩系数 C_{mz} , 计算公式如下:

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

$$C_L = \frac{2F_1}{\rho S V^2} \quad (2)$$

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

$$C_{mz} = \frac{2M_z}{\rho b S V^2} \quad (4)$$

$$K = \frac{c_l}{c_d} \quad (5)$$

式中, b 为网板弦长 (m), ρ 为流体密度 (kg/m^3), V 为流速 (m/s), μ 为流体动力黏性系数 [$\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$], F_1 为网板扩张力 (N), F_d 为网板阻力 (N), S 为网板面积 (m^2), M_z 为俯仰力矩 (N·m)。其中, 升力系数和阻力系数均为进入自动模型区后测量值的平均值。

数值模型参数定义 本数值模型中假设流体为定常、不可压缩, 控制方程有连续性方程和 N-S 方程:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} \quad (7)$$

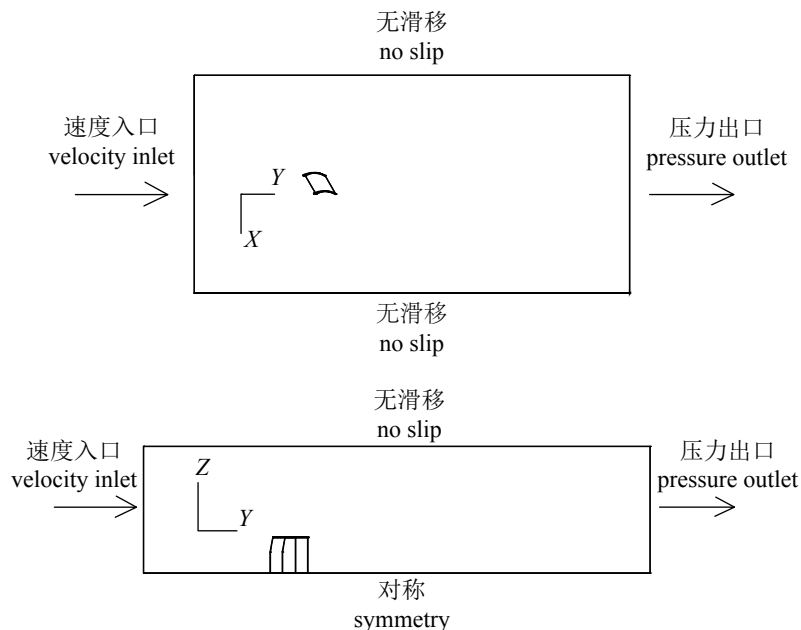


图 5 边界条件设置(上:俯视图,下:正视图)

Fig. 5 Boundary condition setting(top: vertical view, bottom: front view)

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

2 结果

2.1 展弦比、弯曲度和后退角对水动力性能的影响

网板展弦比对水动力性能的影响 1、2 和 3 号模型网板升力系数均在冲角 25° 时最大; 而 4 号模型网板升力系数在冲角 20° 时最大; 其中 2 号模型网板升力系数最高, 为 1.70。不同展弦比下的升力系数随冲角变化趋势一致, 即当冲角小于临界冲角时升力系数逐渐增大, 超过临界冲角后急剧下降; 而阻力系数均随冲角增大而增大, 其中 1、2 和 3 号模型网板阻力系数相差较小; 4 号模型网板在不同冲角下的阻力系数值均低于其他 3 个展弦比的模型。1、2 和 4 号模型网板升阻比均在冲角 10° 时最大, 分别为 3.60、3.30 和 3.80; 3 号模型网板升阻比在冲角 15° 最大, 为 3.50 (图 6)。2 号模型网板升阻比保持较高水平时的适宜冲角范围较其他 3 个展弦比的模型大。

网板弯曲度对水动力性能的影响 3 种弯曲度模型网板的升力系数随冲角变化趋势相同, 均为冲角小于临界冲角时逐渐增大, 超过临界冲角后逐渐减小 (图 7)。5 号模型网板升力

系数在冲角为 20° 时最大, 为 1.53; 2 号模型网板升力系数在冲角 25° 时最大, 为 1.70; 6 号模型网板升力系数在冲角 35° 下最大, 为 1.69。不同弯曲度下阻力系数随冲角变化趋势一致, 均为随冲角增大而增大。冲角大于 15° 后, 6 号模型网板的阻力系数值逐渐低于 2 和 5 号的模型网板; 冲角大于 25° 后, 2 号模型网板的阻力系数值高于 5 和 6 号两种模型网板。5 号模型网板升阻比在冲角 5° 时最大, 为 5.29; 2 号模型网板升阻比在冲角 10° 时最大, 为 3.35; 6 号模型网板升阻比在冲角 20° 时最大, 为 2.69。2 号模型网板升阻比随冲角变化趋势较其他 2 个模型网板稳定。

网板后退角对水动力性能的影响 2 和 8 号模型网板升力系数均在冲角 25° 达到最大, 分别为 1.70、1.69; 7 号模型网板升力系数在冲角 20° 最大, 为 1.48 (图 8)。3 种后退角模型网板的升力系数随冲角变化趋势一致, 均为小于临界冲角时逐渐增大, 大于临界冲角后逐渐减小; 阻力系数则均随冲角增大而增大, 但各冲角下的数值较为接近。2、7 和 8 号模型网板升阻比均在冲角 10° 时最大, 分别为 4.01、3.35 和 3.54。2 号模型网板的升阻比保持较高水平时, 适宜冲角范围较其他 2 个模型网板大。

2.2 模型网板水动力系数的数值模拟结果

通过对比不同结构参数网板水动力性能可

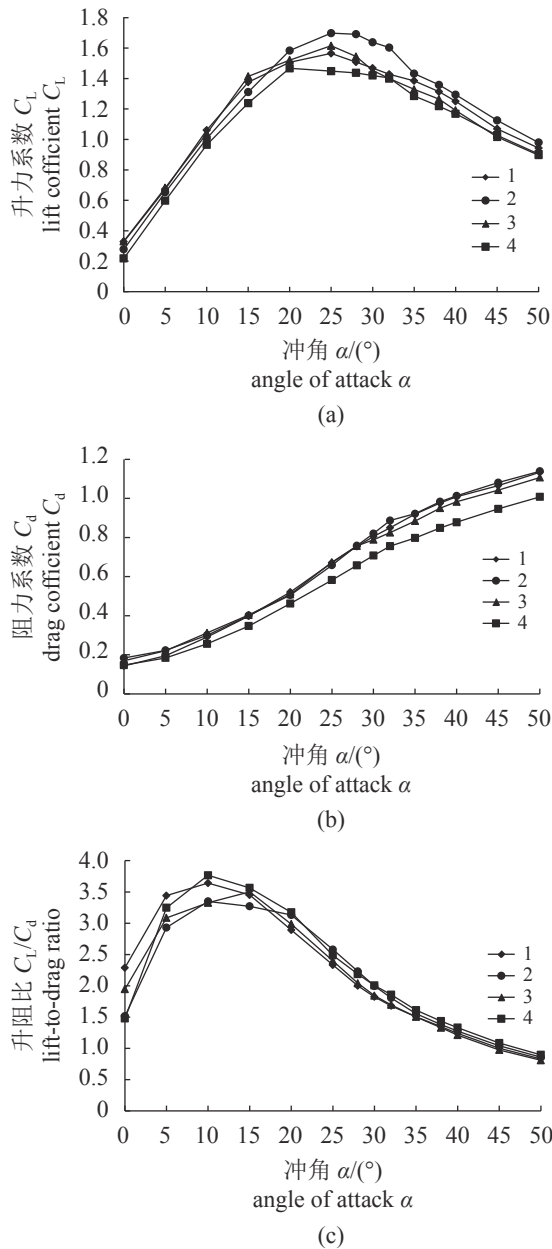


图 6 不同展弦比下升力系数 (a)、阻力系数 (b) 和升阻比 (c) 与冲角关系

Fig. 6 Relationship between lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (c) and angle of attack at different aspect ratios

知, 展弦比 3.0、弯曲度 15% 和后退角 10° 的网板水动力性能最优, 故选用 2 号模型网板进行数值模拟。模型试验和数值模拟得出的 2 号网板升力系数均在冲角 25° 时最大, 分别为 1.70 和 1.88, 两者随冲角的变化趋势一致, 均为小于临界冲角时逐渐增大, 大于临界冲角后急剧减小。冲角在 $20^\circ \sim 32^\circ$, 升力系数值均大于 1.6, 表明此冲角范围内网板具有较高升力。升力系数和阻力

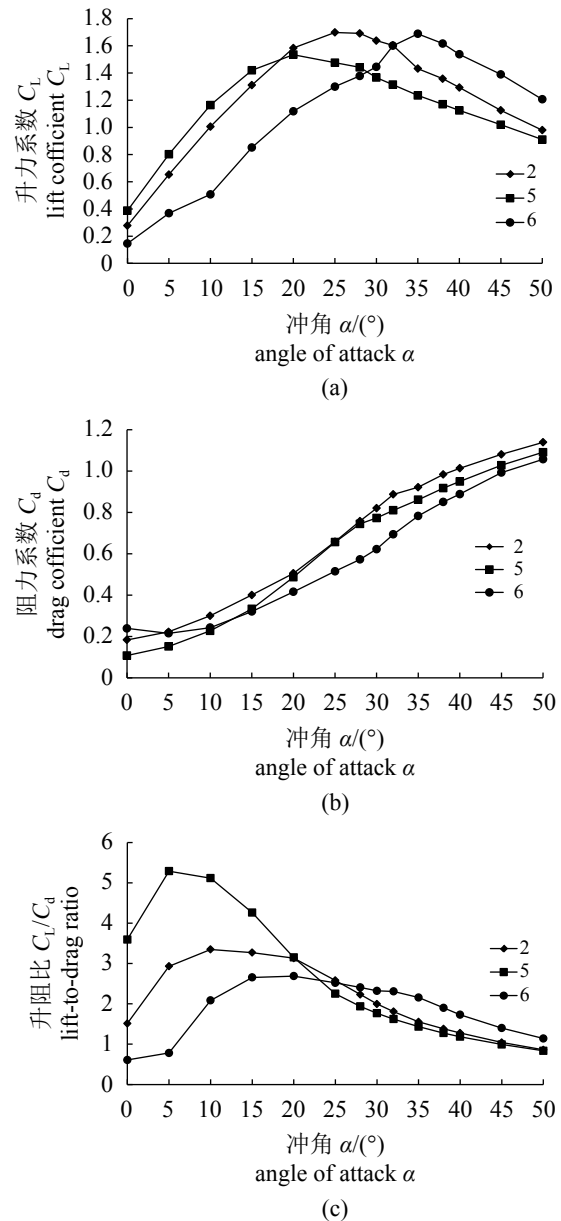
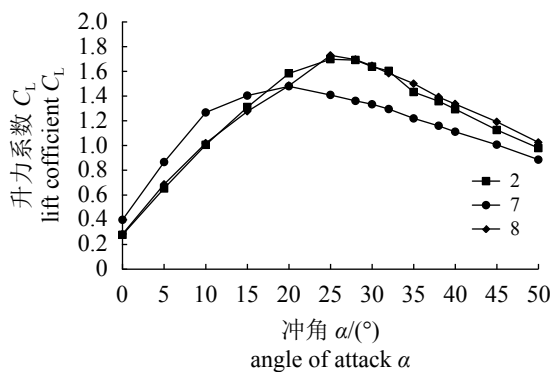


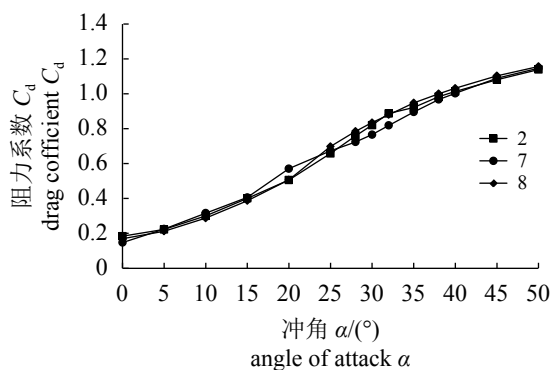
图 7 不同弯曲度模型网板升力系数 (上)、阻力系数 (中) 和升阻比 (下) 与冲角关系

Fig. 7 Relationship between lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (x) and angle of attack for model otter boards with different camber ratios

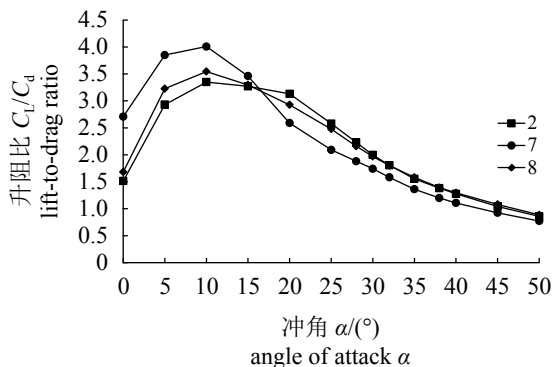
系数的试验值和模拟值分别在冲角小于 25° 和 20° 时吻合较好, 两者的试验值和模拟值均在冲角大于 25° 后差异较大。升、阻力系数的模拟值在各个冲角下均大于模型试验值, 但数值模拟结果和模型试验结果总体上差异性较小。升阻比的试验值和模拟值均在冲角 10° 时最大, 分别为 3.35 和 3.24, 模型试验结果和模拟结果在冲角 0° 时差异较大, 其余冲角下吻合较好 (图 9)。



(a)



(b)

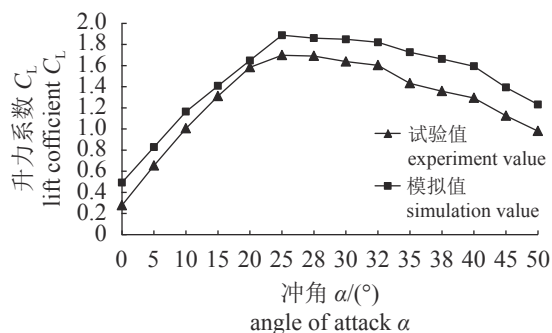


(c)

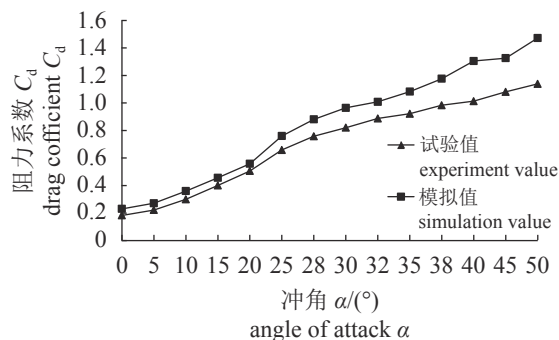
图 8 不同后退角下升力系数 (a)、阻力系数 (b) 和升阻比 (c) 与冲角关系

Fig. 8 Relationship among lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (c) and angle of attack for different sweepback angles

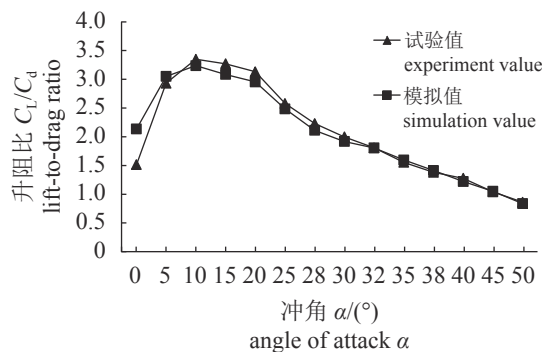
2 号模型网板在冲角 25° 下各测试点流速的测定值和模拟值如表 2 所示。其中初始入口速度为 0.50 m/s, 测试点 7 的流速测定值和模拟值差别最小, 仅为 0.60%; 而测试点 6 的流速测定值和模拟值差别最大, 为 7.30%, 平均偏差为 4.40%。总之, 各测试点流速试验值和模拟值吻合较好 ($P < 0.01$), 表明数值模拟结果较为准确, 可为今后模型试验中提供科学依据。



(a)



(b)



(c)

图 9 2 号模型网板升力系数 (a)、阻力系数 (b) 和升阻比 (c) 与冲角关系的试验值和模拟结果比较

Fig. 9 Comparison of the relationship between lift coefficient (a), drag coefficient (b), lift-to-drag ratio (c) and angle of attack in model test and simulation calculation of No. 2 model otter board

2.3 网板周围流场可视化

2 号模型网板在不同冲角下中心平面和翼端平面的流场云图分布如图 10 和图 11 所示。流速方向为从下自上, 图 10 中红色部分流速均大于 0.60 m/s, 由于此部分流速增大, 导致压力减小, 产生网板扩张力, 并随着冲角增大呈先增大后减小趋势; 蓝色部分流速均为负值, 表明此部分为旋涡, 即产生网板阻力, 其随冲角增大而一直增大。边界层分离点随冲角增大逐渐向网板前沿移动。图 11 中左侧翼板表面在冲角 30° 时

表 2 各测试点的流速测定值和模拟值
Tab. 2 Measured and simulated velocity values of each measurement point

测试点 measurement point	试验值/(m/s) measured value	模拟值/(m/s) simulated value	偏差 deviation
1	0.56	0.60	0.07
2	0.55	0.52	-0.05
3	0.46	0.48	0.05
4	0.39	0.40	0.01
5	0.44	0.47	0.06
6	0.53	0.49	-0.07
7	0.51	0.51	0.01
8	0.49	0.45	-0.07
9	0.48	0.47	-0.01
10	0.53	0.50	-0.05
11	0.53	0.50	-0.04

形成明显涡旋，右侧翼板附近低压区随冲角增大逐渐减小，网板尾部随冲角增大形成明显的翼端涡，网板后端流速减小区域随冲角增大而增大。总之，数值模拟结果与水槽试验结果吻合较好，并通过分析网板周围流场可直观的体现出网板各部位受力情况。

3 讨论

3.1 网板水动力影响因素及模型方法分析

网板的结构参数是影响水动力性能的关键因素，本实验通过水槽试验和数值模拟方法得出立式双曲面网板展弦比 3.0、弯曲度 15% 和后退角 10° 时升力系数在冲角 25° 下达到最大，这与 Fukuda 等^[21] 研究结果一致。由立式双曲面网板结构可知，交错角和翼弦间隔比等^[22] 参数也是影响水动力性能的重要因素，因此在今后的研究中可加入其对水动力性能的影响分析，以便评价网板水动力性能更加全面。雷诺数是网板模型试验中需考虑的重要因素，本实验中雷诺数在 $3 \times 10^4 \sim 6.1 \times 10^4$ ，升力系数、阻力系数和纵向力矩系数基本保持不变，即进入自动模型区。

目前，利用水槽和风洞^[23] 进行网板模型试验较为广泛，对于中表层网板水动力性能研究中使用这两种试验方法得到的结果相近^[1]，但对于底拖网网板，需考虑海底对网板性能的影响，故利用水槽进行网板模型试验较为合适。网板

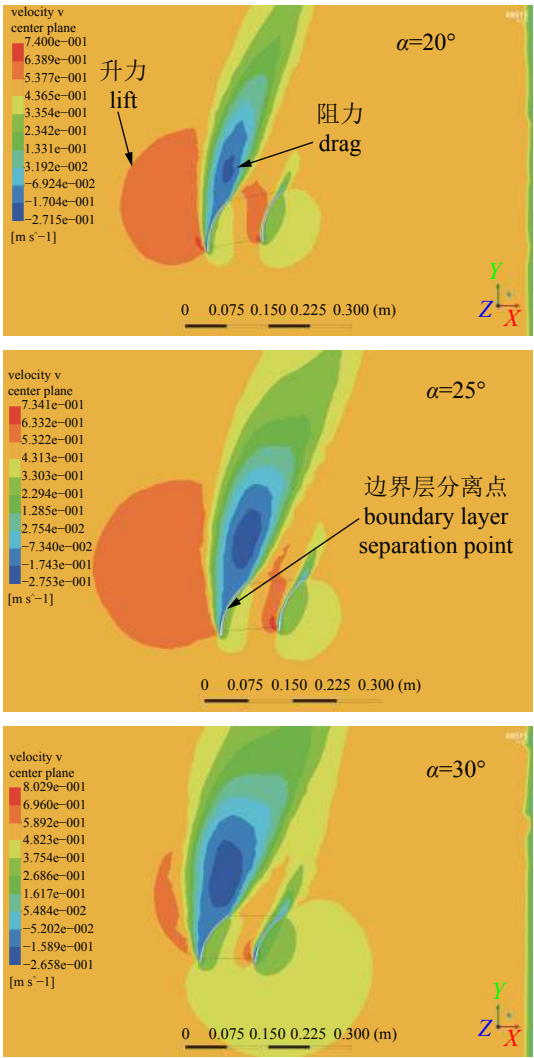


图 10 2 号模型网板中心平面流场分布

Fig. 10 Flow field distribution around the central plane of No.2 model otter board

模型试验时模型尺度比的选择会直接影响试验的准确性，因此网板模型试验时应选择合适的模型尺度比，尽可能降低模型的尺度效应对试验结果的影响^[24]。随着计算机技术的快速发展，CFD 数值模拟技术成为研究网板水动力性能的重要方法，其中主要的分析方法有 CFX^[25] 和 FLUENT。相比较而言，CFX 有网格划分精度高、求解模型精确性高和耦合求解器可靠性强的优点，但求解计算速度慢。因此，在网板数值模拟中可分析两种方法对模拟结果的影响。

3.2 水槽试验与数值模拟结果比较

水槽试验与数值模拟的升力系数、阻力系数和升阻比结果平均偏差分别为 21%、19% 和 1.2%，模拟结果较水槽模型试验值偏高，主要原

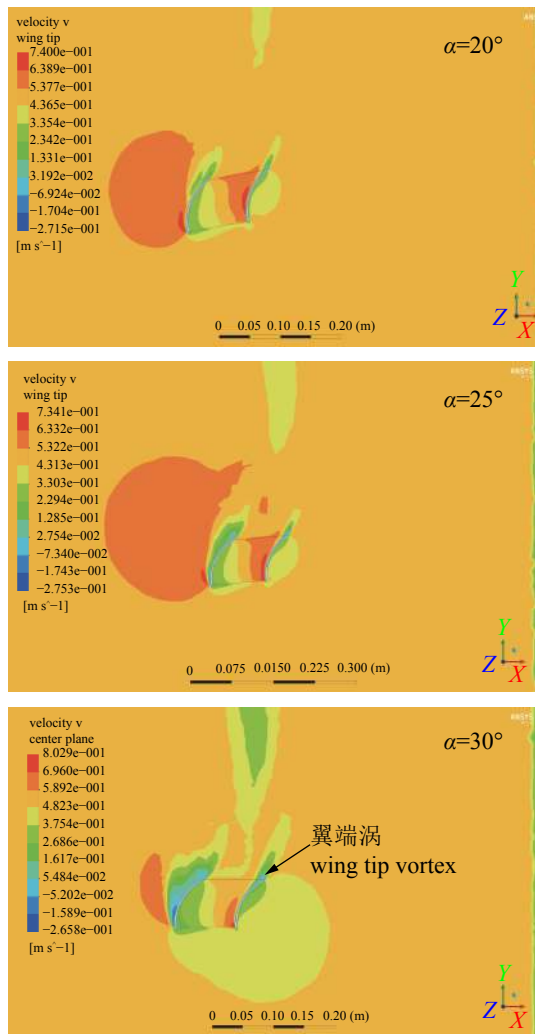


图 11 2 号模型网板翼端平面流场分布

Fig. 11 Flow field distribution around the wing tip of No.2 model otter board

因可能是一方面数值模拟中模型网板表面没有考虑摩擦力,造成网板受力值测定误差,另一方面在水槽试验中模型网板与六分力传感器之间通过连接杆固定,而在数值模拟中没有将连接杆放入计算区域,忽略了水流经过连接杆时发生分离,从而在后面形成尾流涡旋,造成网板后部流速测定的误差。

升力系数的水槽试验值和数值模拟值在小于临界冲角 25° 时差异较小,大于临界冲角后差异较大,主要原因为当冲角接近临界冲角时,由于网板周围流场的不稳定性,产生部分乱流,造成模型试验中测定值的误差,故今后模型试验中可重复多次试验,计算平均值,确保得到网板精度可靠的流体动力特性。2 号模型网板后部流速的测定值和模拟值平均偏差 4.40%,2 种

研究结果吻合较好 ($P < 0.01$),表明数值模拟较为准确,因此今后可先进行数值模拟,排除干扰因素,再进行模型试验,降低试验成本。

3.3 流场可视化

目前实现网板周围流场可视化的方法主要有气泡法^[26]、线条法^[27]和 CFD 数值模拟,其中气泡法通过电解水产生氢气泡,随水流流动经过物体后流态改变,进而判断流态分布,具有准确描述涡旋流态分布的优点,其缺点为电解水过程耗时太多;线条法是将微型线条固定在网板一端,根据自由端在水流中呈现的姿态来判断流的方向,具有操作简易的优点,缺点主要为只能定性观测分析网板周围流态变化。CFD 数值模拟技术具有省时、费用低等优点,同时也可将网板周围流态尤其是边界层分离情况准确地体现出来。利用可视化研究网板周围流态分布和网板水动力特性关系,不仅了解网板流态变化的原因,而且为今后网板的改进提供更直观的依据。

有学者提出利用粒子图像测速^[28](particle image velocimetry, PIV) 技术实现流场可视化,可更有效地展现出流态的分布情况,但目前还仍未在研究网板周围流态可视化中应用。PIV 工作原理与气泡法相似,在水槽中加入的荧光粒子,随水流流动根据流态结构均匀分布,其具备对流场无干扰和单点测量技术的高精度分辨率,可以定量描述出速度场和涡量场变化的优点。因此,今后可引入 PIV 技术实现网板周围流场可视化,以便更准确地测量网板水动力特性。

参考文献 (References):

- [1] 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: 34-40.
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(in Chinese).
- [2] 孙满昌. 海洋渔业技术学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 93-100.
Sun M C. Marine fishery technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 93-100(in Chinese).
- [3] 刘健, 黄洪亮, 吴越, 等. 2 种立式曲面缝翼式网板水动力性能的试验研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(1): 68-74.
Liu J, Huang H L, Wu Y, *et al.* Model test of hydro-

- dynamic characteristics of two types of vertical cambered slotted otter boards[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 68-74(in Chinese).
- [4] 徐宝生, 张勋, 王明彦. 单船拖网网板的现状及发展趋势[J]. *福建水产*, 2010(1): 86-90.
- Xu B S, Zhang X, Wang M Y. A review on the trawl otter board evolution[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2010(1): 86-90(in Chinese).
- [5] 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, 11(S1): 107-113.
- 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, 11(S1): 107-113(in Chinese).
- [6] 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.
- Zhuang X, Xing B B, Xu C C, *et al.* Research overview on hydrodynamic characteristics of otter board[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(5): 63-68(in Chinese).
- [7] 李崇聪. V 型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.
- 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(in Chinese).
- [8] Takahashi Y, Fujimori Y, Hu F X, *et al.* Shape optimization for otter board using computational fluid dynamics analysis and response surface methodology[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2017, 83(6): 950-960.
- [9] Fukuda K, Matuda K, Hu F X, *et al.* A model experiment on hydrodynamic characteristics of biplane-type otter board[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1997, 63(2): 207-212.
- [10] 刘圣聪, 刘佳茗. 矩形曲面网板水动力性能的数值模拟[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(18): 92-94, 108.
- Liu S C, Liu J M. Numerical simulation on hydrodynamic performance of rectangular otter boards with different aspect ratios[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(18): 92-94, 108(in Chinese).
- [11] 王磊, 王鲁民, 冯春雷, 等. 叶板尺度比例变化对单缝曲面网板水动力性能的影响[J]. *渔业现代化*, 2015, 42(6): 55-60.
- Wang L, Wang L M, Feng C L, *et al.* Influence of vane dimension on hydrodynamic performances of single slotted cambered otter board[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(6): 55-60(in Chinese).
- [12] Su X, Lu H S, Feng B, *et al.* Hydrodynamic characteristics of the double-winged otter board in the deep waters of the Mauritanian Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1417-1424.
- [13] Fukuda K, Hu F X, Tokai T, *et al.* Effect of aspect ratio on lift and drag coefficients of cambered plates[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2000, 66(1): 97-103.
- [14] Park C D, Matuda K, Hu F X, *et al.* Hydrodynamic characteristics of cambered plates in free stream and near the bottom[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1993, 59(4): 627-632.
- [15] 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.
- 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(in Chinese).
- [16] Park C D, Matuda K, Hu F X. Effects of dihedral and sweepback angles on lift and drag of the cambered otter board[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1996, 62(6): 920-927.
- [17] Jonsson I M, Leifsson L, Koziel S, *et al.* Trawl-door shape optimization by space-mapping-corrected CFD models and kriging surrogates[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 80: 1061-1070.
- [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 Engineering*, 2018, 162: 108-116.
- [19] 赵云鹏, 毕春伟, 董国海, 等. 平面网衣周围流场的三维数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(5): 606-613.
- ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, *et al.* Three dimensional numerical simulation of the flow field around fishing net panel[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(5): 606-613(in Chinese).
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Takahashi Y, Fujimori Y, Hu F X, *et al.* Design of trawl otter boards using computational fluid dynamics[J]. *Fisheries Research*, 2015, 161: 400-407.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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 Engineering*, 2017, 142: 338-347.
- [26] Shen X L, Hu F X, Kumazawa T, *et al.* Hydrodynamic characteristics of a hyper-lift otter board with wing-end plates[J]. *Fisheries Science*, 2015, 81(3): 433-442.
- [27] Park C D, Matuda K, Tokai T. Surface flow visualization of flat plates by tuft method[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1994, 60(2): 193-199.
- [28] Mills R, Sheridan J, Hourigan K. Particle image velocimetry and visualization of natural and forced flow around rectangular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 478: 299-323.

Hydrodynamic performance and flow field visualization of hyperboloid otter board

LIU Zhiqiang¹, XU Liuxiong^{1,2,3}, TANG Hao^{1,2,3*}, HU Fuxiang⁴, ZHOU Cheng¹, CHEN Mingxin¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai; 201306, China;

4. Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 108-8477, Japan)

Abstract: The otter board is one of the important attachments in the trawl operation system; the hydrodynamic performance is directly related to the expansion of the trawl mouth and affects its production effect and economic benefits. Hyperboloid otter board is widely used in the mid-layer trawl fishery off the Japan coast due to the high lift. The author used the single factor test method to study the hydrodynamic performance of hyperboloid model otter boards using the flume experiment and numerical simulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) with different aspect ratios λ (2.5, 3, 3.5, 4), camber ratio f/C (10%, 15%, 20%) and sweepback angle A (0° , 10° , 15°), analyze the hydrodynamic performance of the otter boards with different structural parameters, compare the results of the two methods, and visualize the flow field around the otter board. The results show: (1) No.2 otter board ($\lambda=3$, $f/C=15\%$, $A=10^\circ$) has the highest lift coefficient when the angle of attack is 25° , the model experiment value is 1.7, the simulation value is 1.88, and the drag coefficient increases with the increase of the angle of attack, the average deviation of the simulated and measured values of the flow velocity at the back is 4.4%, and the results obtained by the two methods are highly consistent ($P<0.01$). (2) In the flow field distribution, the separation point of the boundary layer of No.2 otter board moved with the increase of the angle of attack and gradually moved to the leading edge of the fore wing, the rear vortex of the central plane increased with the increase of the angle of attack, and the left side low pressure zone increased first and then decreased with the increase of the angle of attack, and the tail of the otter board increased with the angle to form a distinct wing tip vortex, which produced vortex lift to provide additional lift to the otter board, making hyperboloid have higher lift than other types otter board. The results of this study have reference value for the development of the otter board or optimized otter board performance.

Key words: hyperboloid otter board; hydrodynamic performance; flume experiment; numerical simulation; flow field visualization

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

Funding projects: Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (31902426, 41806110); Special Project for the Exploitation and Utilization of Antarctic Biological Resources of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (D8002-17-0109); Shanghai Sailing Program (19YF1419800)