

DOI: 10.12264/JFSC2023-0225

不同姿态下仔稚鱼采样网用台字形沉降板水动力特性

刘志强¹, 万荣^{1,2,3}, 胡夫祥⁴, 叶旭昌^{1,2,3}, 周成^{1,2,3}, 刘志良¹, 张元锐⁵

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, 东京 108-8477;
5. 山东好运通网具科技股份有限公司, 山东 荣成 264200

摘要: 定量仔稚鱼采样网的使用有利于评估渔业资源补充量和群体数量的动态变化, 为进一步提升渔业资源的可持续利用提供决策依据。为掌握采样网用沉降板水动力特性, 本研究利用水槽模型实验探究仔稚鱼采样网用台字形沉降板在不同倾斜姿态下(内、外、前、后)的水动力性能变化, 并利用 OpenFOAM 的数值模拟方法分析不同姿态下沉降板周围流场变化。结果显示: (1) 不同姿态下沉力系数随倾角和冲角增大均呈先增大后减小趋势, 其均在倾角 5°时达到最大, 内、外倾斜下最大值分别为 1.75 和 1.77 ($\alpha=25^\circ$), 前、后倾斜下最大值均为 1.78 ($\alpha=25^\circ$); 阻力系数随倾角增大逐渐减小, 随冲角增大逐渐增大; 沉阻比随倾角和冲角增大均呈先增大后减小趋势, 内、外倾斜下分别在倾角 20°和 10°时最大, 为 3.73 和 3.76 ($\alpha=20^\circ$), 前、后倾斜下均在倾角 5°时最大, 分别为 3.67 和 3.71 ($\alpha=20^\circ$)。压力中心系数在不同冲角下基本保持不变, C_{pc} 随倾角增大逐渐增大, C_{pb} 随倾角增大基本保持不变。(2) 沉降板外侧的流速随倾角增大逐渐减小; 外倾状态下沉降板边界层分离点随倾角增大逐渐向翼板前缘移动; 前、后倾状态下沉降板后部的流速衰减区随倾角增大逐渐增大。本研究阐明了不同倾斜状态下沉降板的水动力性能变化, 为进一步合理安装和调整沉降板工作姿态提供科学依据。

关键词: 台字形沉降板; 倾角; 水动力性能; 水槽实验; 数值模拟; 流场分布

中图分类号: S973

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)10-1282-10

仔稚鱼采样调查是评估渔业资源现状, 阐明渔业资源补充机制, 实现对渔业资源可持续利用的重要方法^[1-2]。采样调查中主要根据站点深度和调查性质利用网具进行垂直或者倾斜拖曳, 迫使鱼类浮游生物进入网具达到调查的目的。传统调查网具网口形状多为圆形^[3]和方形框架^[4], 网身为锥形或金字塔形^[5], 末端连接收集器用于收集仔稚鱼样品, 其具有操作便捷和造价低廉的优点。随着对仔稚鱼生活史的深入研究发现传统调查方法采集的仔稚鱼多为早期阶段, 具有因捕食

者和海洋流等因素导致的高死亡率特点, 故据此评估的渔业资源补充量有较大差异。同时, 晚期仔稚鱼能够有效的避开采样网具导致对晚期的仔稚鱼生活史研究欠缺^[6]。因此, 有学者提出对仔稚鱼的调查实施定量采样方法。

定量采集特定鱼种的仔稚鱼有利于充分掌握其资源量变动, 促进渔业资源管理措施的合理制定。目前, 改进采样网具结构是实现快速定量采集仔稚鱼的目的的主要方式。Roe 等^[7]设计的一种矩形多网囊中层采样拖网(rectangular midwater

收稿日期: 2023-09-05; 修订日期: 2023-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41806110); 国家重点研发计划项目(2019YFD0901502); 上海海洋大学科技发展专项基金项目(A2-2006-22-200208).

作者简介: 刘志强(1994-), 男, 博士研究生, 研究方向为渔具理论与设计. E-mail: lzhiqiang716@126.com

通信作者: 刘志良, 工程师, 研究方向为渔具设计与船舶性能. E-mail: zlliu@shou.edu.cn

trawl, RMT)可同时采集多水层仔稚鱼,具有采样量大且可分层定量采集的优点,但由于其叉纲仅安装于网口框架的上端导致网口角度随拖速的变化而改变。随后,各学者逐渐开发出不同样式的多水层采样网,如 Wiebe 等^[8]开发的一种多网囊开闭环境感知系统采样网(multiple opening/closing net and environmental sensing system, MOCNESS),其可实时显示多网囊拖曳状态等信息,但适合使用的拖速较低。Sameoto 等^[9]通过改变采样网安装方向增大网口扫海面积开发了一种多网囊采样网(Bedford institute of oceanography net and environmental sampling system, BIONESS),有效的减少了网口处扰流结构。为解决多网囊采样网仅适用拖速较低的局限性,IKMT^[10](Issacs-Kidd midwater trawl)型多层采样网被开发,其网口面积可达 $7\sim 8\text{ m}^2$ 且配备宽 3 m 的 V 形沉降板以提供充足的下沉力,满足在高拖速下稳定使用。但由于沉降板安装在网口的下部,故其作业时网具的深度取决于拖速的变化。随后, Methot^[6]对其进行了优化,将网口制成刚性框架,利用钢索在网口两侧吊挂 V 形平面沉降板,但由于沉降板两侧各只有一根钢索吊挂导致其冲角受拖速变化影响较大。Hu 等^[11-12]开发的 MOHT 型(Matuda, Oozeki & Hu midwater trawl)采样网解决了之前学者设计采样网时网具深度随拖速变化明显改变的缺点,其配备的 V 形曲面沉降板在任意流速下冲角均固定,使得网具在特定水层能够稳定拖曳。

沉降板处于受力平衡是保持网具在恒定水层拖曳的关键,计算发现利用 4 根钢索构成平行四边形结构将沉降板吊挂在网口下方可保持固定冲角^[11]。当沉降板在任意拖速下冲角均固定时其提供的下沉力即为定值,因此在曳纲长度不变的情况下网具均可处于同一水层作业^[13]。沉降板通过钢索与网口连接,在复杂水域内作业时可能导致沉降板发生倾斜,使其水动力性能改变,进而使得网具所处水层产生变化。因此,对不同姿态下的沉降板水动力性能研究尤为重要^[14]。目前模型实验和数值模拟方法相结合已成为研究水动力性能的主要方式之一^[15-16],其结果相互辅佐与验证,有利于准确了解不同状态下沉降板的水动力性能

变化。计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)因其省时省力的优点广泛应用于数值模拟中,OpenFOAM 作为其中一款完全由 C++语言编写的开源数值模拟软件备受较多学者使用,其在处理复杂流体结构问题中具有明显优势^[17-18]。

本研究利用水槽模型实验和 OpenFOAM 数值模拟方法,研究不同倾斜状态(内、外、前、后)对沉降板水动力性能的影响,探究不同倾角下工作姿态变化与其水动力系数的关系,并分析不同倾角的变化对沉降板周围流场分布的影响,为合理安装和调整沉降板姿态提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 沉降板模型参数

基于上海海洋大学“淞航号”采样网用台字形沉降板原型,制作尺度比为 1/5 的沉降板模型,其结构参数如图 1 所示,展弦比为 5,面积为 476.29 cm^2 ,弯曲度 f 为 15%,上反角 γ 为 20° ,各翼板中间由直径 4 mm 的实心棒贯穿焊接加固,模型由厚度 2 mm 的钢板制成。

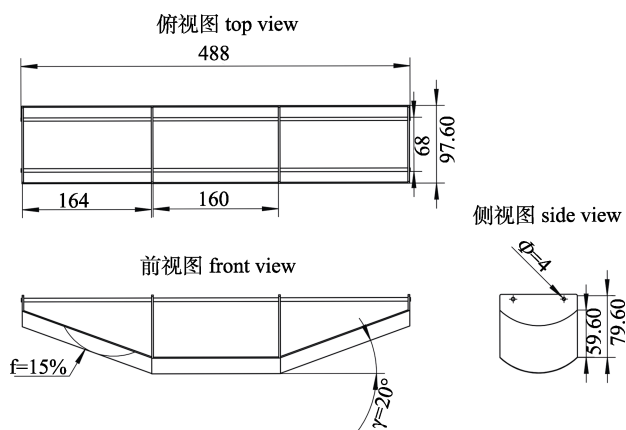


图 1 沉降板模型结构参数

Fig. 1 Structure parameters of the depressor model

1.2 水槽实验

沉降板模型水动力测试在上海海洋大学循环水水槽完成。水槽侧面设有长 15 m, 宽 2 m, 水深 2.3 m 的观测窗。实验中流速通过调整控制系统的轴流泵实现,流速设置为 $50\sim 90\text{ cm/s}$, 10 cm/s 为一个间隔。利用六分测力传感器(量程 5 kgf, 精度 2%)测量沉降板受力值,数据采样频率为 100 Hz。

沉降板和六分测力传感器间利用直径 20 mm, 长 40 cm 的连接杆连接。实验中冲角 α 设置为 $15^\circ \sim 35^\circ$, 5° 为一个间隔。如图 2 所示, 倾角 β 设置为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 5° 为一个间隔, 当沉降板沿水流方向倾斜时为前后倾斜状态, 垂直水流方向倾斜时为内外倾斜状态。实验时水温 23.6°C , 密度为 999.8 kg/m^3 。

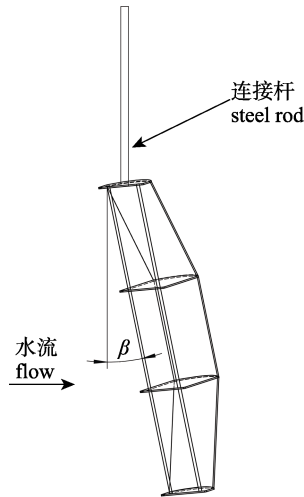


图 2 沉降板模型安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of installation of depressor model

1.3 数值模拟

数值模拟利用在 Ubuntu 操作系统下的 OpenFOAM v2306 开源软件完成。模拟计算区域如图 3 所示, 长 2 m, 宽 1 m, 高 1 m, 沉降板中心距四面墙壁为 0.5 m, 距前端水流入口为 1 m。计算区域均使用四面体网格划分, 在沉降板表面区域进行网格加密设置边界层, 第一层厚度为 $3.2 \times 10^{-2}\text{ mm}$, 最大层为 15, 增长率为 1.2, 模拟计算区域总网格数为 2.7×10^6 。模拟计算的湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 求解方法选用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation algorithms), 其中压力场求解器选用多重网格求解器 (GAMG), 速度和湍流场选用光滑求解器 (smoothSolver)。离散格式中设置梯度项 (gradSchemes) 为高斯线性 (Gauss linear); 对流项 (divSchemes) 为有界高斯迎风线性限制 (bounded Gauss linearUpwind limited); 拉普拉斯项 (laplacianSchemes) 为高斯线性校正 (Gauss linear corrected)。模拟计算区域边界条件如表 1 所示。

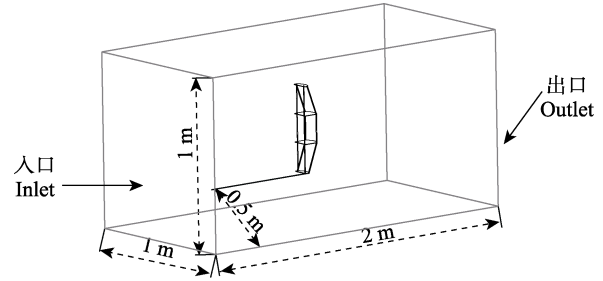


图 3 数值模拟计算区域

Fig. 3 Domain of the numerical simulation calculation

表 1 数值模拟条件设置

Tab. 1 Condition setting of numerical simulation

边界变量 boundary variable	入口 inlet	出口 outlet	墙壁 wall	沉降板 depressor
速度 velocity	固定值	零梯度	无滑移	无滑移
压力 pressure	零梯度	固定值	零梯度	零梯度
湍流动能 turbulence kinetic energy	固定值	零梯度	kqR 壁 面函数	kqR 壁 面函数
湍流黏度 turbulent viscosity	计算值	计算值	nutk 壁 面函数	nutk 壁 面函数
比耗散率 specific dissipation rate	固定值	零梯度	kqR 壁 面函数	kqR 壁 面函数

1.4 相关参数定义

1.4.1 沉降板水动力参数定义 通过上述水槽实验测量的沉降板模型阻力 (F_x) 和沉力 (F_z), 利用公式 (1)~(7) 计算得出沉降板阻、沉力系数 (C_x , C_z)、力矩系数 (M_x , M_y) 和压力中心系数 (C_{pb} , C_{pc}) 等水动力特性参数。

$$R_e = \frac{Vc\rho}{\mu} \quad (1)$$

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho SV^2} \quad (2)$$

$$C_z = \frac{2F_z}{\rho SV^2} \quad (3)$$

$$C_{my} = \frac{2M_y}{\rho cSV^2} \quad (4)$$

$$C_{mx} = \frac{2M_x}{\rho bSV^2} \quad (5)$$

$$C_{pb} = \frac{d_b}{b} = \frac{C_{mx}}{(C_L \cos \alpha + C_d \sin \alpha) \cos \beta + C_z \sin \beta} \quad (6)$$

$$C_{pc} = \frac{d_c}{c} = \frac{C_{my}}{(C_L \cos \alpha + C_d \sin \alpha) \cos \beta + C_z \sin \beta} \quad (7)$$

式中, c 为沉降板翼弦 (m), b 为沉降板翼展 (m), ρ

为流体密度(kg/m^3), V 为流速(m/s), μ 为流体动力粘性系数 $[\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})]$, F_x 为沉降板阻力(N), F_z 为沉降板沉力(N), S 为沉降板面积(m^2), M_y 为纵向力矩($\text{N}\cdot\text{m}$), M_x 为滚转力矩($\text{N}\cdot\text{m}$), d_b 为沉降板翼展到压力中心距离(m), d_c 为沉降板翼弦到压力中心距离(m), C_{pc} 翼弦方向压力中心系数, C_{pb} 翼展方向压力中心系数, α 为沉降板冲角, β 为沉降板倾角。

1.4.2 数值模拟模型参数定义 本数值模拟采用不可压缩流体模型^[19-20], 连续方程和N-S方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) \quad (9)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, t 为时间, $\nu = \mu/\rho$, $p = P/\rho$, 其中, ν 为运动黏性系数, μ 为流体动力黏性系数, p 为运动压力, P 为压力, ρ 为密度。

k - ε 湍流模型中湍流动能、比耗散率和湍流黏度计算公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + \quad (11)$$

$$\frac{C_1 \varepsilon}{k} \left(P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中, k 为湍流动能(m^2/s^2), D_k 为湍流动能有效扩散系数, P 为湍流动能增长率(m^2/s^3), ε 为湍流比耗散率(m^2/s^3), ν_t 为湍流黏度, C_1 、 C_2 和 C_μ 是模型系数, 分别为 1.44, 1.92, 0.09。

2 结果与分析

2.1 水动力系数与雷诺数的关系

沉降板水动力系数与雷诺数的关系如图 4 所示, 其中沉力和阻力系数随雷诺数增大基本保持不变。在一定雷诺数下, 沉力系数随冲角增大呈先增大后减小趋势, 在冲角 20° 时达到最大, 平均为 1.58。阻力系数随冲角增大逐渐增大。当冲角为 10° 时, 沉力系数在雷诺数大于 0.6×10^5 后有较小波动; 当冲角在 50° 时, 阻力系数在雷诺数大于 0.5×10^5 后有增大趋势。综上所述, 雷诺数在 $0.3 \sim 0.85 \times 10^5$ 范围内时沉力系数和阻力系数基本保持恒定, 因此将使用水动力系数的平均值进行后续分析。

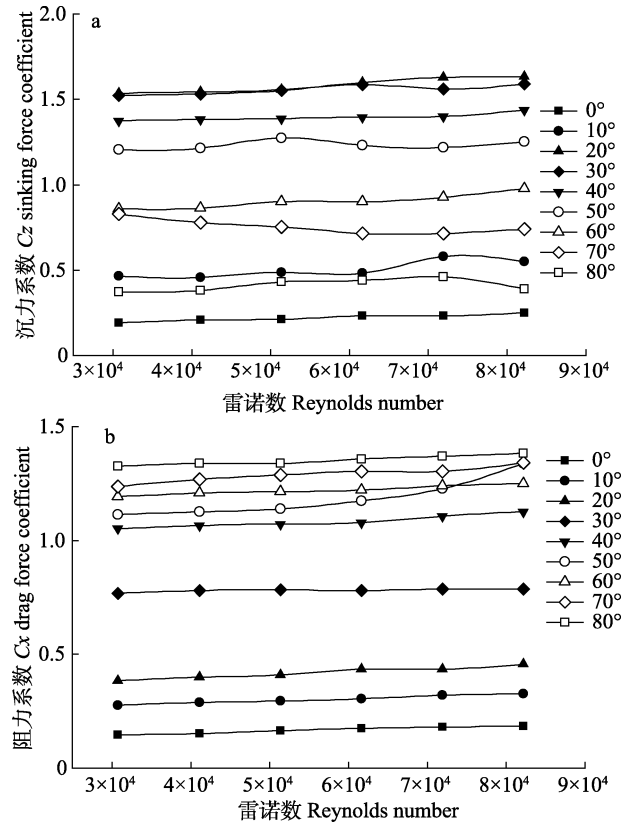


图 4 沉力和阻力系数与雷诺数的关系

Fig. 4 Relationship between sinking coefficient (a), drag coefficient (b) and Reynolds number

2.2 内、外倾斜对沉降板水动力性能的影响

2.2.1 不同内外倾角下水动力系数变化 不同冲角下沉降板水动力系数与倾角的关系如图 5 所示, 其中倾角负值时为内倾, 倾角正值时为外倾。内、外倾斜状态下沉力系数随倾角增大均呈先增大后减小趋势, 均在倾角 5° 时达到最大, 分别为 1.75 和 1.77 ($\alpha=25^\circ$)。阻力系数随倾角增大逐渐减小, 随冲角增大逐渐增大。沉阻比随倾角和冲角增大均呈先增大后减小趋势, 内、外倾状态下其分别在倾角 20° 和 10° 时最大, 为 3.73 和 3.76 ($\alpha=20^\circ$); 其余冲角下沉阻比均在倾角 5° 时达到最大。

2.2.2 不同内外倾角下压力中心系数变化 不同冲角下压力中心系数与内外倾角的关系如图 6 所示, 其中外倾状态下压力中心系数 C_{pb} 随倾角增大逐渐增大; 内倾状态下 C_{pb} 在倾角小于 15° 时变化较小, 之后明显增大。压力中心系数 C_{pc} 随内外倾角增大均逐渐增大。压力中心系数 C_{pb} 和 C_{pc} 随冲角变化均基本保持不变。

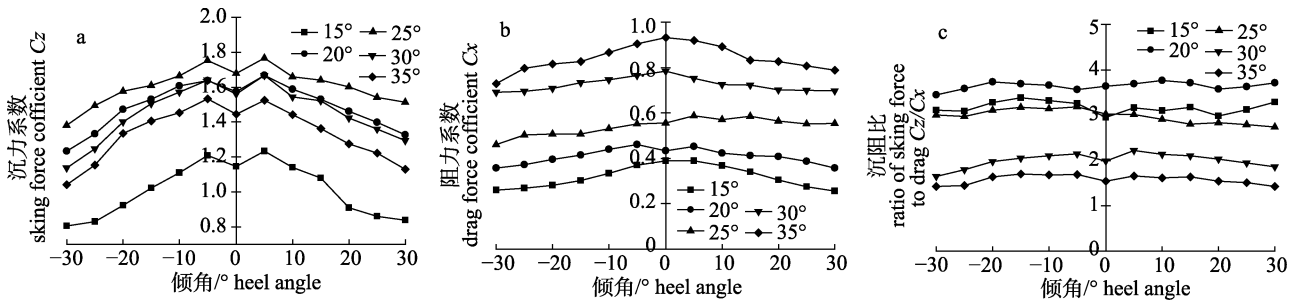
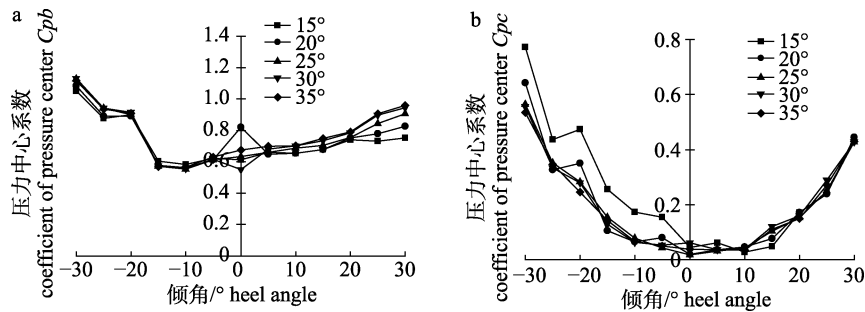


图 5 不同冲角下沉力(a)、阻力系数(b)和沉阻比(c)与内外倾角的关系

Fig. 5 Relationship between sinking (a), drag coefficient (b), ratio of sinking force to drag (c) and heel angle of inward and outward at different angle of attack

图 6 不同冲角下压力中心系数 C_{pb} (a)和 C_{pc} (b)与内外倾角的关系Fig. 6 Relationship between coefficient of pressure center C_{pb} (a), C_{pc} (b) and heel angle of inward and outward at different angle of attack

2.3 前、后倾斜对沉降板水动力性能的影响

2.3.1 不同前后倾角下水动力系数变化 前、后倾斜状态下沉降板水动力系数与倾角的关系如图 7 所示, 其中倾角为负值时为前倾, 倾角正值时为后倾。沉力系数随倾角和冲角增大均呈先增大后减小趋势, 前、后倾状态下其均在倾角 5° 时达到最大, 均为 1.78 ($\alpha=25^\circ$)。阻力系数随倾角增大逐渐减小, 随冲角增大逐渐增大, 后倾状态下在倾角大于 20° 后有较大波动。沉阻比随倾角和冲角增大均呈先增大后减小趋势, 前、后倾斜状态下均在倾角 5° 时达到最大, 分别为 3.67 和 3.71 ($\alpha=20^\circ$)。

2.3.2 不同前后倾角下压力中心系数变化

图 8 所示为沉降板前、后倾斜状态下压力中心系数与倾角的关系, 其中压力中心系数 C_{pb} 随倾角和冲角增大基本保持不变。压力中心系数 C_{pc} 随倾角增大逐渐增大; 随冲角增大基本保持不变。

2.4 不同倾角下沉降板周围流场分布

冲角 20° 时沉降板不同倾斜姿态下周围流场分布如图 9~12 所示, 水流方向为从左至右, 初始流速为 0.8 m/s 。水流经过沉降板时在周围形成明显的流速衰减区, 沉降板外侧的流速随倾角增大逐渐减小导致沉力系数逐渐减小。内倾状态下随

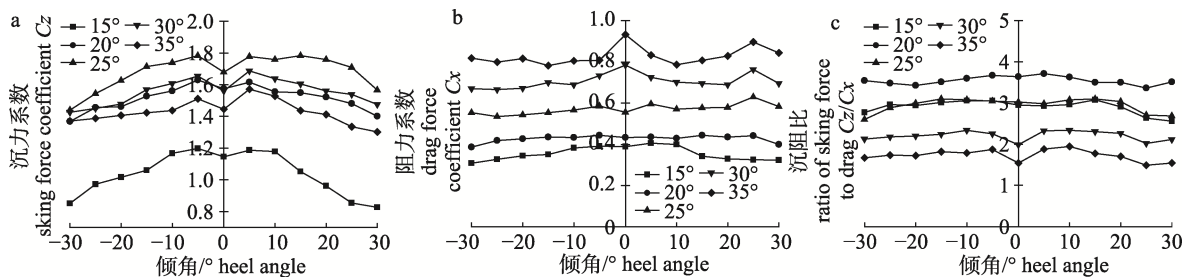


图 7 不同冲角下沉力(a)、阻力系数(b)和沉阻比(c)与前后倾角的关系

Fig. 7 Relationship between sinking (a), drag coefficient (b), ratio of sinking force to drag (c) and heel angle of tilt at different angle of attack

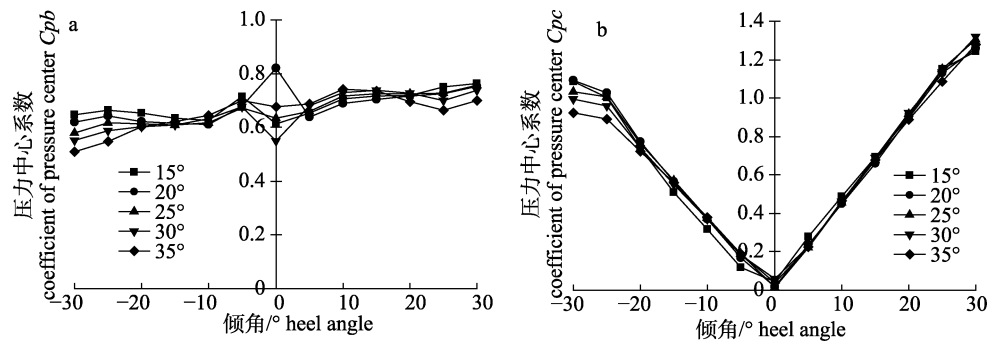
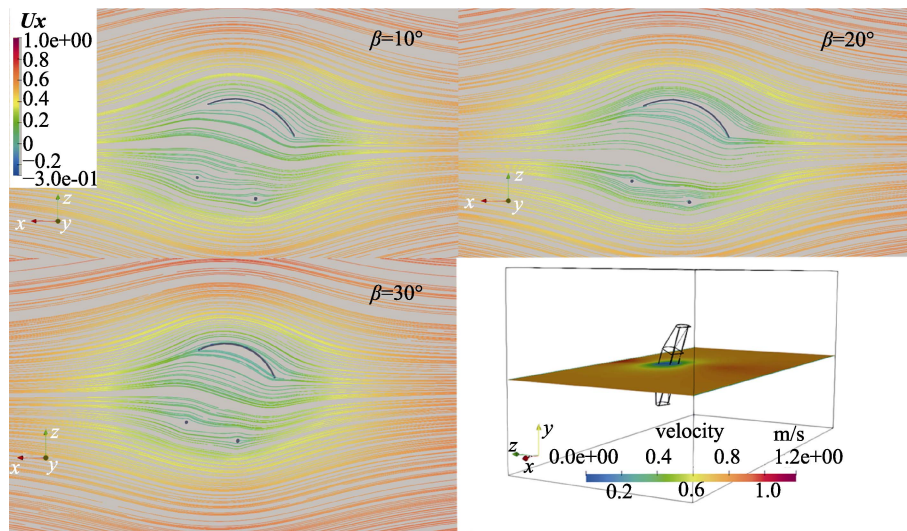
图 8 不同冲角下压力中心系数 C_{pb} (a) 和 C_{pc} (b) 与前后倾角的关系Fig. 8 Relationship between coefficient of pressure center C_{pb} (a), C_{pc} (b) and heel angle of tilt at different angle of attack

图 9 内倾状态下沉降板周围流场分布

 U_x 为 x 轴方向速度矢量.

Fig. 9 Flow field distribution around of depressor under different inward inclination conditions

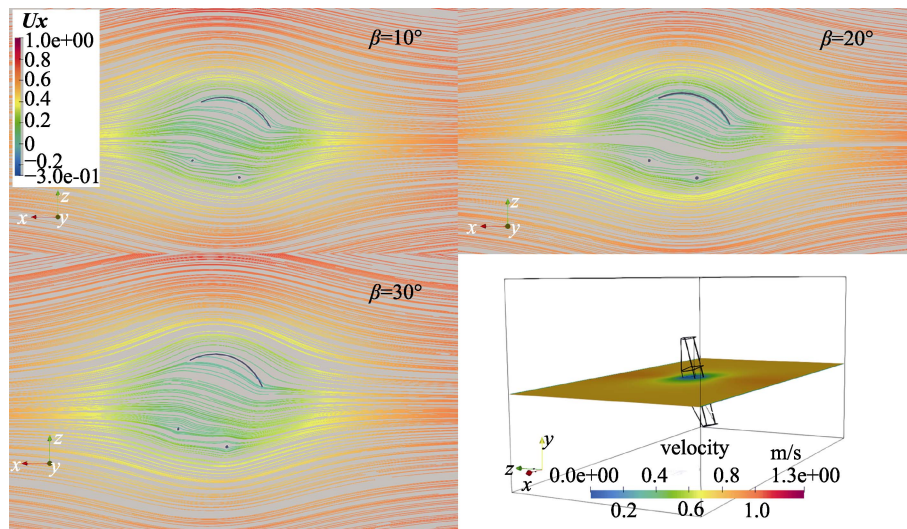
 U_x is the velocity vector on the x -axis direction.

图 10 外倾状态下沉降板周围流场分布

 U_x 为 x 轴方向速度矢量.

Fig. 10 Flow field distribution around of depressor under different outward inclination conditions

 U_x is the velocity vector on the x -axis direction.

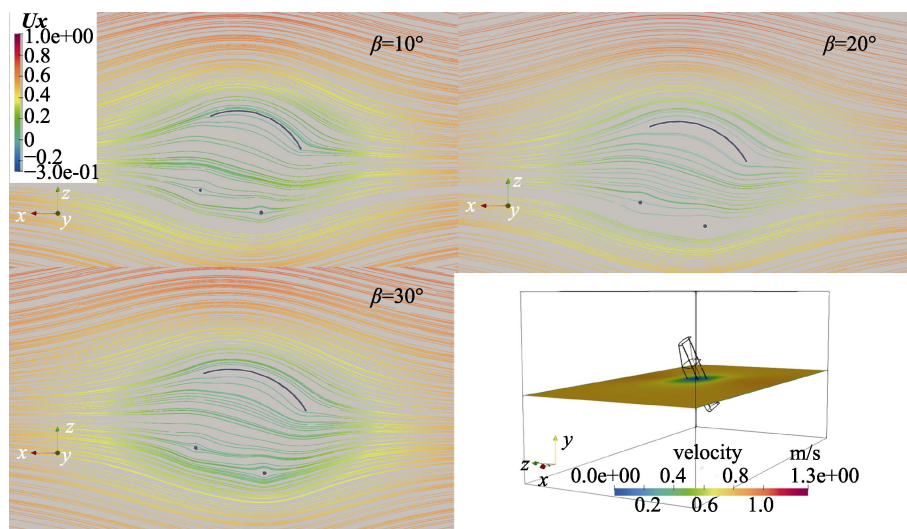


图 11 前倾状态下沉降板周围流场分布

 U_x 为 x 轴方向速度矢量.

Fig. 11 Flow field distribution around of depressor under different forward tilt inclination conditions

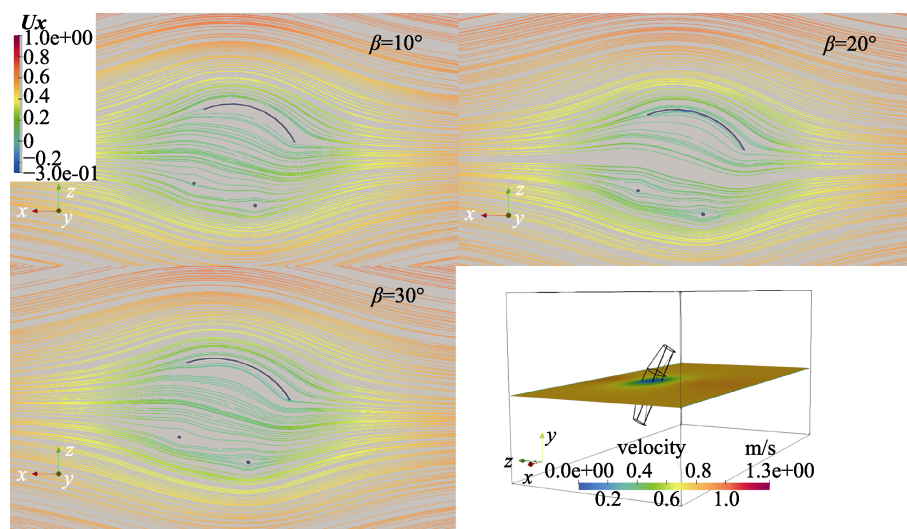
 U_x is the velocity vector on the x -axis direction.

图 12 后倾状态下沉降板周围流场分布

 U_x 为 x 轴方向速度矢量.

Fig. 12 Flow field distribution around of depressor under different back tilt inclination conditions

 U_x is the velocity vector on the x -axis direction.

倾角增大沉降板内侧表面与水流接触程度逐渐减小, 流速逐渐增大(图 9)。外倾状态下水流与沉降板外侧的边界层分离点随倾角增大逐渐向翼板的前缘移动(图 10)。前、后倾状态下沉降板后部的流速衰减区随倾角增大逐渐增大(图 11 和图 12)。

3 讨论

3.1 沉降板水动力性能分析

沉降板与网口框架之间是通过柔性钢索连接,

不同的工况条件下沉降板的姿态对其水动力性能具有较大影响, 本研究结果表明台字形沉降板沉力系数随冲角和倾角增大均呈先增大后减小趋势, 不同倾斜状态下均在倾角 5° 时达到最大; 阻力系数随冲角增大逐渐增大, 随倾角增大逐渐减小, 这与 Hu 等^[14]研究的 V 形曲面沉降板在不同倾角下水动力系数变化的结果基本一致。但台字形沉降板的沉力系数在冲角 25° 时达到最大, 而 V 形曲面沉降板则在冲角 20° 时最大, 且此时其沉力

系数小于台字形沉降板。

台字形沉降板与 V 形沉降板主要区别在于在两侧翼板间加装了一块曲面板, 这是导致台字形沉降板沉力系数较高的主要原因。此外, 采样网作业结束后在甲板存放时台字形沉降板因具有中间的曲面板比 V 形沉降板更易摆放, 降低了占用空间提升了便携性。本研究中的台字形沉降板使用方式与 Hu 等^[11]设计的 V 形曲面沉降板相同, 在沉降板两端焊接挂耳, 利用 4 根相互平行的钢索吊挂于网口下方, 使得沉降板在任意流速下均可保持固定冲角, 进而保证网具可在特定水层中稳定拖曳。因此, 台字形结构沉降板相较 V 形曲面结构具有明显优势, 在之后应用中可显著提升采样网作业性能。

3.2 模型实验分析和沉降板类型及安装方式探讨

目前水槽模型实验方法因具有操作便捷和条件可控的优点已广泛应用于研究拖网属具水动力性能中。沉降板作业时主要通过钢索吊挂于网口下方, 其工作姿态为卧式作业状态, 水流经过沉降板时在其内外两侧形成压力差, 进而产生下沉力使得采样网能够到达目标水层。在本研究的模型实验中通过连接杆将沉降板以立式状态与六分力仪连接, 此实验设计与沉降板实际应用状态存在差异, 主要原因为利用六分力仪进行测力时是通过圆柱形杆件与其连接, 并且实验条件复杂无法通过柔性绳索或刚性框架保持沉降板实际应用状态实现冲角和倾角的连续改变。模型实验中沉降板连接状态虽与其实际使用状态存在差异, 但实验中沉降板已完全浸入水中, 测量时仅产生的水动力方向不同, 其实验结果仍较为准确可靠。同时, 本研究在沉降板后倾角 20° 以上时阻力系数出现随倾角增大呈先增大后减小的趋势, 其主要原因可能为倾角过大时导致周围流场不稳定, 使得沉降板发生晃动致使受力值产生误差。沉降板在作业过程中受到复杂水流的作用产生不同的倾斜姿态, 由图 6 和图 8 中的压力中心系数结果可以看出内外倾角在 15° 以内时和前后倾角在 20° 以内压力中心至翼展的距离基本保持不变, 表明沉降板在受到外力作用发生倾斜时具有较好的复原性, 对其水动力性能影响较小。

沉降板在采样网系统中起到为网具提供充足下沉力, 并使得网具能够保持恒定水层拖曳的作用。早期的 IKMT 型采样网使用的沉降板为 V 形平面结构, 其安装于网口下方且后部与网衣直接相连, 这样的安装方式导致连接沉降板前端的叉纲周围产生大量湍流, 使得仔稚鱼更易发现采样网具进而主动躲避。同时, 平面形结构的沉降板水动力性能较低^[14], 不能为采样网提供充足的下沉力。为了减少叉纲周围的湍流, 将网口制作成刚性框架, 并利用两根钢索在框架两端固定进行网具拖曳, 其中沉降板也利用两根钢索吊挂于网口下方。这样的安装方式大大降低了网口处湍流的产生, 且扩大了适用的拖速范围。但随之而来的问题是当拖速为零时沉降板将垂直向下不会产生除了重力外的任何下沉力, 同时在高拖速时沉降板会向后上方摆动直至水平, 此时产生的阻力最大且几乎没有下沉力^[6]。相比而言, Hu 等^[14]设计的 V 形曲面和本研究中的台字形曲面沉降板水动力性能相对较高, 在采样网作业中可提供充足的下沉力。同时, 利用结构为平行四边形的四根钢索连接沉降板可保证其在任意流速下冲角均恒定。

参考文献:

- [1] Yan J, Xu Z J, Li T J, et al. Spatiotemporal dynamics of larvae and juveniles in Zhoushan coastal waters and their relationship with environmental factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(3): 799-810. [严峻, 徐志进, 李铁军, 等. 浙江舟山近海仔稚鱼时空动态变化及与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(3): 799-810.]
- [2] Zou M X, Chen Y G, Song X J, et al. Distribution and drift trend of *Collichthys lucidus* larvae and juveniles in the coastal waters of the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(04): 557-568. [邹明汐, 陈渊戈, 宋小晶, 等. 黄海南部近岸水域棘头梅童鱼仔稚鱼的分布和漂移趋势[J]. *水产学报*, 2022, 46(4): 557-568.]
- [3] Ye Y R. Study on the diversity of fish eggs and larvae in Fujian coastal waters [D]. 2022. [叶燕如. 福建近海鱼卵、仔稚鱼多样性研究[D]. 厦门大学, 2022.]
- [4] Habtes S, Muller-Karger F E, Roffer M A, et al. A comparison of sampling methods for larvae of medium and large epipelagic fish species during spring SEAMAP ichthyoplankton surveys in the Gulf of Mexico[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2014, 12: 86-101.
- [5] Itaya K, Fujimori Y, Shiode D, et al. Sampling performance

- and operational quality of a frame trawl used to catch juvenile fish[J]. *Fisheries Science*, 2001, 67: 436-443.
- [6] Methot R D. Frame trawl for sampling pelagic juvenile fish[J]. *Calcofi Reports*, 1986, 27: 267-278.
- [7] Roe H S J, Shale D M. A new multiple rectangular midwater trawl (RMT 1+8M) and some modifications to the institute of oceanographic sciences' RMT 1+8[J]. *Marine Biology*, 1979, 50: 283-288.
- [8] Wiebe P H, Burt K H, Boyd S H, et al. A multiple opening/closing net and environmental sensing system for sampling zooplankton[J]. *Journal of Marine Research*, 1976, 34(3): 313-326.
- [9] Sameoto D D, Jaroszynski L O, Fraser W B. Bioness, a new design in multiple net zooplankton samplers[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1980, 37(4): 722-724.
- [10] Isaacs J D, Kidd L W. Isaacs-Kidd midwater trawl[J]. Final Report. Scripps Institution of Oceanography Reference, 1953, 53: 1-18.
- [11] Hu F X, Oozeki Y, Tokai T, et al. Scale model of a new midwater trawl system for sampling pelagic larval and juvenile fish[J]. *Fisheries Science*, 2001, 67: 254-259.
- [12] Hu F X, Oozeki Y, Tokai T, et al. Development of a new midwater sampling trawl[J]. *Fisheries Science*, 2002, 68: 1899-1900.
- [13] Oozeki Y, Hu F X, Kubota H, et al. Newly designed quantitative frame trawl for sampling larval and juvenile pelagic fish[J]. *Fisheries Science*, 2004, 70: 223-232.
- [14] Hu F X, Oozeki Y, Tokai T, et al. Hydrodynamic characteristics of cambered V-type depressor for sampling midwater trawl[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2000, 66(5): 846-851.
- [15] Liu Z Q, Xu L X, Tang H, et al. Hydrodynamic performance and flow filed 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.]
- [16] 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.
- [17] Mi S, Wang M Y, Avital E J, et al. An implicit Eulerian-Lagrangian model for flow-net interaction using immersed boundary method in OpenFOAM[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112843.
- [18] He R L, Zheng H F, Ma S, et al. Hydrodynamic simulation and experiment of depth adjustable beam trawl for Antarctic krill[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2023, 28: 399-409.
- [19] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1974, 3(2): 269-289.
- [20] Jasak H, Jemcov A, Tukovic Z. OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations[C]. *International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics*, 2007, 1000: 1-20.

Hydrodynamic characteristics of frustum type depressor for sampling midwater trawl with different positions

LIU Zhiqiang¹, WAN rong^{1,2,3}, HU Fuxiang⁴, YE Yuchang^{1,2,3}, ZHOU Cheng^{1,2,3}, LIU Zhiliang¹, ZHANG Yuanrui⁵

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;

5. Shandong Haoyuntong Nets Technology Co., Ltd., Rongcheng 264300, China

Abstract: The sampling trawl of Quantitative sampling of larval and juvenile fish is advantageous for assessing dynamic changes in fishery resource replenishment and population numbers. It provides a basis for decision-making to further enhance the sustainable use of fisheries resources. In this study, a flume tank experimental method was employed to investigate the hydrodynamic performance variations of a frustum-type depressor for sampling trawls with different inclined positions (inward, outward, and tilted). Furthermore, numerical simulations using OpenFOAM were employed to analyze the alterations in the flow field around the depressor at different positions. The results showed that the sinking coefficient of the depressor initially increased and then decreased with increasing angle of attack and heel angle, and both reached their maximum values at a heel angle of 5°. The maximum values for inward and outward inclined were 1.75 and 1.77 ($\alpha=25^\circ$), respectively, and the maximum values for tilt were both 1.78 ($\alpha=25^\circ$). The drag coefficient gradually decreased with increasing heel angle and increased with increasing angle of attack. The ratio of the sinking force to drag initially increased and then decreased with increasing angle of attack and heel angle. The maximum values were reached at heel angles of 20° and 10° for inward and outward inclined, with values of 3.73 and 3.76, respectively ($\alpha=20^\circ$). The maximum values were reached at a heel angle of 5° for tilted, with values of 3.67 and 3.71, respectively ($\alpha=20^\circ$). The pressure center coefficient remains relatively constant at different angles of attack. C_{pc} gradually increases with increasing heel angle, while C_{pb} remains constant with increasing heel angle. The flow velocity on the outer side of the depressor decreased gradually as the heel angle increased. Under outward inclination, the boundary layer separation point on the depressor gradually moved toward the leading edge of the plate. In both forward and backward inclination states, the flow velocity decay region at the rear of the depressor gradually expanded as the heel angle increased. This study elucidates the hydrodynamic performance variations of the depressor under different inclination states, providing a scientific basis for further rational installation and adjustment of the working positions of the depressor.

Key words: frustum-type depressor; heel angle; hydrodynamic characteristics; fluent tank experiment; numerical simulation; flow field distribution

Corresponding author: LIU Zhiliang. E-mail: zlliu@shou.edu.cn.