

# 圆形曲面网板水动力学性能研究

冯春雷<sup>1</sup>, 许庆昌<sup>2\*</sup>, 黄六一<sup>3</sup>, 徐基强<sup>3</sup>, 李显森<sup>2</sup>, 王永进<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室, 上海

<sup>2</sup>中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛

<sup>3</sup>中国海洋大学水产学院, 山东 青岛

Email: fengmaster@126.com, \*xuqc@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2021年8月10日; 录用日期: 2021年8月24日; 发布日期: 2021年9月9日

## 摘要

拖网是现代渔业主要作业方式之一, 其中单船拖网是拖网渔业中最常见的作业方式。网板是单船拖网系统的重要属具, 主要为拖网作业提供水平扩张力。本文通过水槽模型试验和数值模拟研究圆形曲面网板的水动力学性能。通过数据处理, 获得该网板的升阻力系数、升阻比以及压力中心系数等水动力参数, 并根据数值模拟结果分析网板周围的流场流态。结果显示, 该网板既有较大的升力系数, 又有较高的升阻比, 且该网板的曲面外形及导流板结构可有效延缓流的分离, 从而增大网板的临界冲角; 数值模拟结果与模型试验结果比较近似, 对网板最大升力系数及最大升阻比的模拟误差均低于10%, 且数值模拟可以有效预测网板的临界冲角。本文建议在条件允许的情况下, 利用水槽试验与数值模拟方法开展网板水动力学性能研究。

## 关键词

圆形曲面网板, 水槽模型试验, 数值模拟, 水动力学性能

# Study on the Hydrodynamic Performance of Circular Cambered Otter Board

Chunlei Feng<sup>1</sup>, Qingchang Xu<sup>2\*</sup>, Liuyi Huang<sup>3</sup>, Jiqiang Xu<sup>3</sup>, Xiansen Li<sup>2</sup>, Yongjin Wang<sup>1</sup>, Lei Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, East China Sea Fisheries Research Institution, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai

<sup>2</sup>Yellow Sea Fisheries Research Institution, Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Email: fengmaster@126.com, \*xuqc@ysfri.ac.cn

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 9<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 冯春雷, 许庆昌, 黄六一, 徐基强, 李显森, 王永进, 王磊. 圆形曲面网板水动力学性能研究[J]. 水产研究, 2021, 8(3): 127-135. DOI: 10.12677/ojfr.2021.83015

## Abstract

Trawling is one of the main methods of modern fisheries, of which the single trawling is the common operation types. Otter board is the vital components of a single trawler system; it can provide the desired horizontal opening of a trawl net. In the present study, the hydrodynamic of a circular cambered otter board was studied using flume tank experiment and numerical simulation. The lift/drag coefficient, lift-to-drag ratio and center-of-pressure coefficient were obtained during the data processing, and the flow distribution around the otter board was analyzed according to the numerical results. It showed that the otter board had a good hydrodynamic performance for its high lift coefficient and lift-to-drag ratio, and the camber/deflector structure can delay the flow separation. Numerical simulation results showed a good agreement with experiment ones and could predict the critical angle of attack. Simulation errors the maximum lift coefficient and lift-to-drag ratio were under 10%. Given the otter boards are operated in water, it was suggested to apply both flume tank experiment and numerical simulation to study the hydrodynamic performance of otter board.

## Keywords

Circular Cambered Otter Board, Flume Tank Experiment, Numerical Simulation, Hydrodynamic Performance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

单船拖网是渔业捕捞中主要作业方式之一，在我国发展历史悠久，也是目前我国远洋渔业中主要的作业方式之一[1] [2] [3]。网板是单船拖网作业系统中的重要构件，它具有实现网具的水平扩张、兼具网具沉降器等作用，其阻力占整个拖网系统阻力的 13%~27% [4]，甚至达到 30% [5]。网板类型的选择、其水动力性能的优劣以及对海洋环境的适应性，是影响拖网的渔获效率和经济效益的重要因素[6] [7] [8]，因此开展网板水动力性能的研究对渔业节能减排、渔业绿色发展具有重要意义。一些发达渔业国家，如日本、丹麦、挪威等国家都对网板的水动力性能进行了深入研究，相继开发出一系列高性能网板[9]。20 世纪 30 年代，德国学者设计出一种大展弦比曲面网板(Suberkrub 网板)，具有升力系数大、效率较高等优点；20 世纪 50 年代，前苏联研制出一种椭圆形平面开缝网板，该网板对渔场的适应性较强，适宜在高低不平的海底拖曳；20 世纪 70 年代，法国研制出一种椭圆形曲面开缝网板，兼具扩张效率高和能越过劣质海底等特点；20 世纪 80 年代，日本研发出一种立式 V 型曲面网板，它吸取了 V 型网板稳定性好和大展弦比曲面网板扩张力大等优点，并加以改进；20 世纪 90 年代，丹麦基于 V 型网板和曲面网板成功开发了矩形 V 型曲面网板，有效网板的效率；20 世纪末，瑞士吸取流体力学的最新研究成果研制成一种高性能喷射型网板，是当今世界上最先进的底拖网板之一；此外还有复翼型网板等[10] [11] [12]。由于我国对网板的研究起步较晚，因此国产网板作业性能与一些先进的渔业国家还存在不小差距，目前仍以借鉴国外先进的高性能网板为主[9] [10]。

目前，网板水动力性能的研究方法主要有理论分析、模型实验(风洞试验和水槽试验)、数值模拟与海上实测等几种方式。Kawakami 等建立网板受力分析理论模型并通过模型试验进行验证[13]；Matuda 等通

过水槽模型试验获得传统 V 型网板最大升力系数为 1.27 [14]; 王磊等通过风洞模型试验研究发现叶板尺度不仅影响网板最大升力系数, 同时影响网板作业稳定性[15]; Takahashi 等通过水槽模型试验验证数值模拟在网板水动力学研究的可行性[16], Xu 等利用数值模拟对 V 型网板展弦比、后退角等参数进行优化 [17]; Sala 等通过海上试验对比研究新型 *Clarck-Y* 网板与传统 V 型网板水动力性能, 并通过海底反作用力分析网板对海底的影响[18]。

本文研究的圆形曲面网板借鉴上述一些高效网板的优点为我国远洋渔业大型拖网船设计的网板, 采用了水槽模型试验和数值模拟方法研究了该网板的水动力学性能, 获得其最大升力系数、最大升阻比、临界冲角等水动力参数, 并对两种方法的试验结果进行对比分析。此外, 根据数值模拟得出的网板周围流场的分布, 分析网板周围流场与网板水动力性能之间的关系。研究结果可为圆形曲面双导流板网板提供水动力参数, 也可为网板水动力学研究方法的选择提供参考。

## 2. 材料与方法

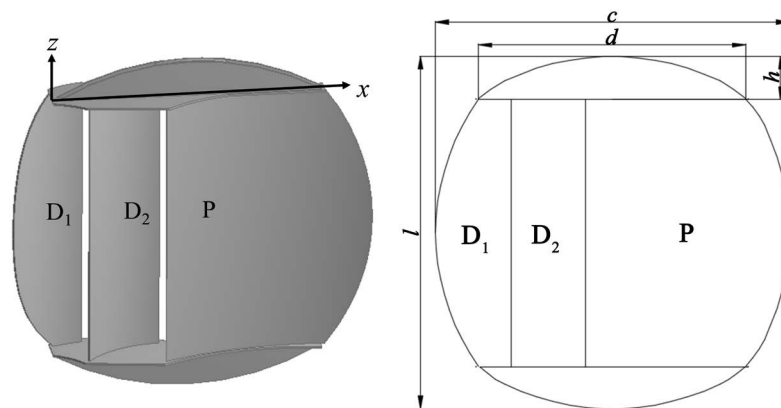
### 2.1. 模型网板

网板原型为全钢结构, 作业时拖速为 3~4 节, 其主要结构参数为, 翼展  $l = 0.55 \text{ m}$ , 翼弦  $c = 0.55 \text{ m}$ , 网板面积  $S = 0.24 \text{ m}^2$ , 展弦比  $AR = l^2/s = 1.25$ 。

图 1 所示为模型网板结构图,  $D_1$  和  $D_2$  为两块导流板, P 为主面板, 导流板之间及导流板与主面板之间的间距为 10 cm。根据弗洛德相似准则[1] [19] [20]设计制作网板模型, 其关系式如下所示:

$$\frac{l_1}{l_2} = s, \quad \frac{S_1}{S_2} = s^2, \quad \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{s} \quad (1)$$

其中, 下标“1”代表原型网板, 下标“2”代表模型网板,  $v$  代表流速,  $s$  代表尺度比, 本文中尺度比为  $s = 3.0$ 。模型网板为全钢结构, 钢板厚度为 5 mm, 其具体结构参数如表 1 所示。



**Figure 1.** Structure of the model otter board (The coordinate frame on it was used to calculate the center-of-pressure of the otter board)

**图 1.** 模型网板结构图(图中坐标系用于计算网板压力中心系数)

**Table 1.** Detailed parameters of the model otter board

**表 1.** 模型网板参数表

结构参数 Parameters	$l/\text{m}$	$c/\text{m}$	$AR$	$S/\text{m}^2$	$d/\text{m}$	$h/\text{m}$	曲率 Camber ratio			角度 Installed angle/ $^\circ$		
							$D_1$	$D_2$	P	$D_1$	$D_2$	P
模型网板 Model otter board	0.55	0.55	1.24	0.243	0.415	0.067	12%	12%	12%	35	30	6

## 2.2. 试验方法

### 2.2.1. 水槽试验

模型网板的水槽试验在中国海洋大学增殖养殖工程水动力实验室循环水槽进行, 水槽试验段尺寸为 4 m (长) × 1.2 m (宽) × 1 m (高)。水槽配有六分力仪传感器(量程 0~50 kg, 精度±0.3%), 以及小威龙 Vectrino 点式流速仪(量程 0~2 m/s, 精度±0.5%), 分别测量网板升阻力及力矩以及流速等数据。试验过程中流速设置为 0.2~0.6 m/s (间隔 0.05 m/s), 即雷诺数为  $R_e = 1.09\sim 3.28 \times 10^5$ , 网板冲角(AOA)为  $0^\circ\sim 70^\circ$ , 间隔  $5^\circ$ , 分别采集各个工况下力及力矩的数据, 数据采集频率为 100 Hz, 采集时间为 90 s。

### 2.2.2. 数值模拟

数值模拟利用 ANSYS 15.0 软件进行, 对水槽模型试验进行数值模拟, 模拟试验条件及模拟工况与模型试验相一致。将水槽的试验段尺寸作为数值模拟的计算域[17] [21], 即  $4.0\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  为水槽模拟计算域。湍流模型选取  $k-\varepsilon$  EARSM 湍流模型, 并利用可伸缩壁面函数(Scalable wall function)进行近壁区处理[22] [23], 数值模拟的具体参数设置如表 2 所示。

Table 2. Parameter settings of the numerical simulation

表 2. 数值模拟参数设置

Settings	Choice
模拟类型 Simulation type	三维稳流 3D, Steady
求解器 Solver	双精度 CFX 求解器 CFX, Double precision
湍流模型 Turbulence model	$k-\varepsilon$ EARSM model
边界条件 Boundary conditions:	
入口 Inlet	速度入口 Velocity inlet
出口 Outlet	压力出口 Pressure outlet
网板 Otter board	无滑移壁面 No-slip wall

数值计算过程中, 网格划分为四面体非结构化网格, 对网板周围网格进行局部加密, 并利用偏斜度 (Skewness) 检查体网格质量, 其最大值小于 0.83 时认为网格质量较好, 可以用于数值计算。对于水槽数值模拟(图 2), 网格数约为  $2.66 \times 10^6$ , 计算节点数约为  $4.81 \times 10^5$ ,  $y^+$  值约为 11.06~80.25, 湍流强度为 3.27%~3.75%, 湍流粘度为  $3.54\sim 9.25 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

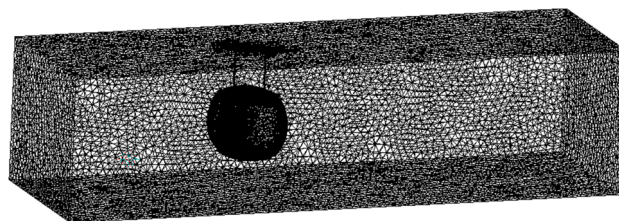


Figure 2. Computational grids of the domain during flume tank simulation

图 2. 水槽试验网格划分图

## 2.3. 数据处理

根据所测得网板升、阻力及力矩数据, 分别求得网板升力系数、阻力系数、升阻比以及力矩系数, 计算公式如下:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho S v^2} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho S v^2} \quad (3)$$

$$C_{mx} = \frac{2M_x}{\rho S v^2 l} \quad (4)$$

$$C_{mz} = \frac{2M_z}{\rho S v^2 c} \quad (5)$$

$$K = \frac{C_L}{C_D} \quad (6)$$

其中,  $F_L$ 、 $F_D$  分别为网板升力和阻力;  $C_L$ 、 $C_D$  分别为网板升、阻力系数;  $\rho$  为流体密度;  $S$  为网板面积;  $M_x$ 、 $M_z$  分别为网板沿  $x$  轴和  $z$  轴的力矩(见图 1);  $K$  为网板升阻比;  $C_{mx}$ 、 $C_{mz}$  为力矩系数。根据所求力矩系数及网板升阻力系数值, 可计算出网板的压力中心系数, 计算公式如下:

$$C_{pl} = \frac{d_l}{l} = \frac{C_{mx}}{C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha} \quad (7)$$

$$C_{pc} = \frac{d_c}{c} = \frac{C_{mz}}{C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha} \quad (8)$$

其中,  $C_{pl}$ 、 $C_{pc}$  分别为网板在翼展(图 1,  $z$  轴)和翼弦(图 1,  $x$  轴)方向的压力中心系数;  $d_l$ 、 $d_c$  分别为压力中心点距网板上缘和前缘的距离。

### 3. 结果

#### 3.1. 网板升力系数

网板升力系数( $C_L$ )随冲角变化的关系曲线如图 3 所示, 升力系数随冲角的增加先增大后减小, 模拟结果与试验结果比较接近, 且与试验结果具有相似的变化趋势。水槽模型试验结果显示, 该网板最大升力系数为  $C_{L-MAX} = 2.421$ , 临界冲角为  $50^\circ$ ; 水槽数值模拟  $C_{L-MAX}$  为 2.309, 临界冲角为  $50^\circ \sim 55^\circ$ , 对最大升力系数的模拟误差为 4.63%。

#### 3.2. 网板阻力系数

网板阻力系数( $C_D$ )随冲角的变化如图 3 所示, 模拟结果与试验结果比较接近, 且具有相近的变化趋势。网板阻力系数随冲角的增加逐渐增大, 当冲角超过临界冲角时, 水槽试验阻力系数增加趋势减缓。在  $0^\circ \sim 70^\circ$  冲角范围内, 水槽模型试验测得网板阻力系数为 0.112~2.301, 水槽数值模拟阻力系数为 0.096~1.976。

#### 3.3. 网板升阻比

升阻比( $K$ )是判断网板水动力效率的重要参数, 其随冲角的变化关系如图 4 所示。网板升阻比随冲角的增加先增大后减小, 且模拟值与实测值比较接近。水槽试验测得网板最大升阻比  $K_{MAX}$  为 3.719, 此时冲角为  $AOA = 25^\circ$ , 水槽模拟  $K_{MAX}$  为 3.942, 冲角为  $AOA = 20^\circ$ , 对最大升力系数的模拟误差为 6.00%。

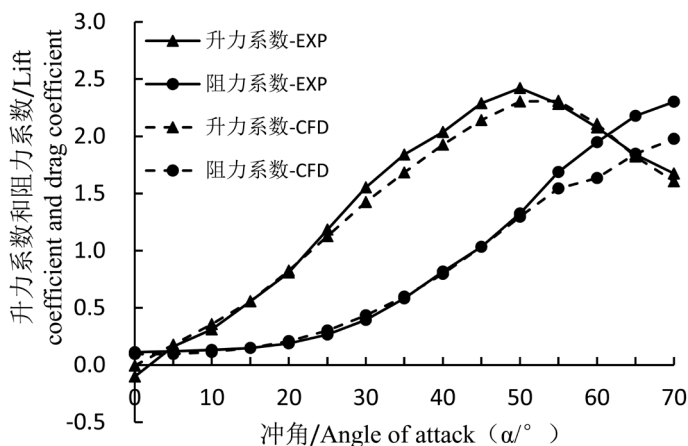


Figure 3. The result of flume tank model experiment and numerical simulation  
图 3. 水槽模型试验及其数值模拟结果

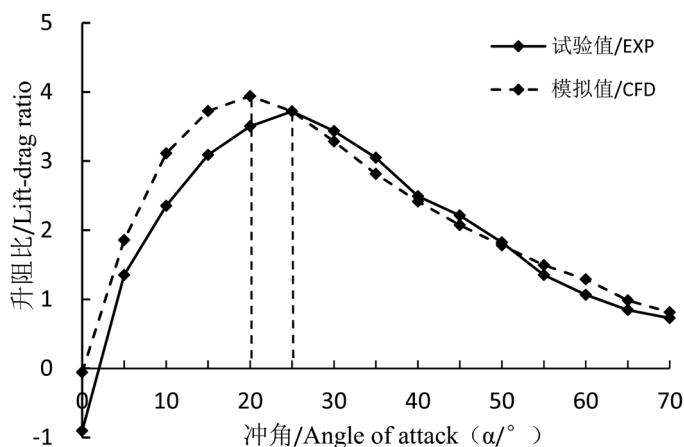


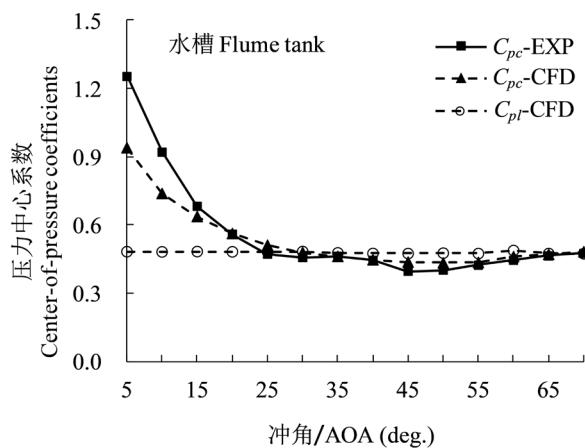
Figure 4. Lift-to-drag ratio of the otter board in relation to the angle of attack  
图 4. 网板升阻比随冲角的变化

### 3.4. 网板压力中心系数

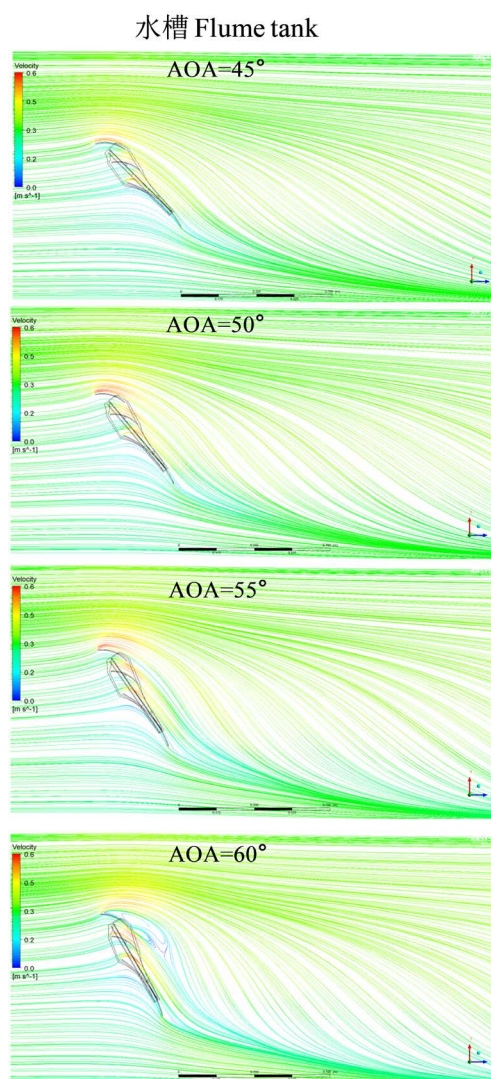
图 5 所示为网板压力中心系数(翼展方向压力中心系数  $C_{pl}$  和翼弦方向压力中心系数  $C_{pc}$ )随冲角的变化关系曲线, 由于模型试验(水槽)时仅测得  $z$  向力矩  $M_z$ , 因此试验值仅测得网板翼弦方向压力中心系数  $C_{pc}$  的值。水槽试验显示, 模拟  $C_{pc}$  值与实测值比较接近, 且随冲角的增加先快速减小后趋于稳定, 而  $C_{pl}$  值则稳定在 0.5 附近, 即随冲角的增加, 网板压力中心点先往网板前缘移动, 冲角超过  $25^\circ$  之后, 压力中心点趋于稳定。

### 3.5. 网板周围流场

基于上述研究结果, 数值模拟可以较好的反应网板水动力学性能, 因此本文选取网板中心横截面分析网板周围流场状况, 结果如图 6 所示。图中网板冲角分别设置为  $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$  和  $60^\circ$ , 即该网板临界冲角附近。水槽试验流线图显示当冲角小于  $55^\circ$  时, 网板迎流面、背流面流线均比较平缓, 没有流分离现象, 同时在该冲角范围内网板背流面流速逐渐增大, 即网板迎流面、背流面压差逐渐增大, 因此网板升、阻力系数均随冲角的增加而增大; 冲角达到  $60^\circ$  时, 网板前缘出现流分离现象并且在网板背流面形成涡流, 此时网板背流面流速开始减小, 网板迎流面、背流面压差逐减小, 导致网板压差所产生的升、阻力均降低。



**Figure 5.** Center-of-pressure coefficients of the otter board in relation to the angle of attack  
**图 5.** 网板压力中心系数随冲角的变化



**Figure 6.** Streamlines from a horizontal plane cutting through the center section of the otter board  
**图 6.** 网板平面中心横切面流线图

## 4. 讨论与结论

### 4.1. 网板水动力性能

本文利用水槽试验及数值模拟方法研究圆形曲面网板水动力性能, 结果显示, 该网板最大升力系数  $C_{L-MAX}$  高于 2.0, 最大升阻比  $K_{MAX}$  超过 3.5, 与传统矩形网板[24]、V 型网板[1]、V 型曲面网板[25]相比, 该网板具有良好的水动力性能。同时, 该网板临界冲角(失速)为  $50^\circ$ , 明显高于上述三种类型网板, 因此, 本文认为该网板曲面和导流板结构可有效减缓流分离的产生。

### 4.2. 数值模拟验证

本文数值模拟计算过程中, 数值模型边界条件及计算域大小均与模型试验保持一致[17] [21], 结果显示, 数值模拟结果均与试验结果近似, 模拟误差低于 10%, 数值模拟可以较好的预测网板升、阻力系数及升阻比等参数随冲角的变化趋势, 且可以有效预测网板临界冲角、压力中心系数等水动力学参数, 同时数值模拟可以较好的反应网板周围流场流态, 因此本文认为数值模拟是网板水动力学研究的一种有效的方法。由于网板是在水中进行作业, 在网板水动力研究过程中应当尽量保证流体介质与实际情况一致, 因此本文建议在条件允许的情况下, 利用水槽试验和数值模拟方法相结合的方式研究网板水动力学性能。

## 基金项目

国家重点研发计划(2020YFD0901205); 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室开放课题(2019HY-XKQ03)。

## 参考文献

- [1] 李崇聪, 梁振林, 黄六一, 周为峰, 孙鹏, 王磊. 小型单拖网渔船 V 型网板水动力性能研究[J]. 海洋科学, 2013(11): 69-73.
- [2] 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(z1): 107-113.
- [3] 虞聪达, 宋伟华. 单船拖网柔性网板的研究(I) [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 1999, 18(1): 1.
- [4] 杨齐. 拖网渔具节能评述[J]. 湛江海洋大学学报, 2000, 20(2): 76-82.
- [5] Sterling D, (2000) The Physical Performance of Prawn Trawling Otter Boards and Low Opening Systems. AME CRC Report, Project 1.4.4, Sterling Trawl Gear Service, Brisbane, 204.
- [6] 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: 160-211.
- [7] Broadhurst, M.K., Sterling, D.J. and Cullis, B.R. (2012) Effects of Otter Boards on Catches of an Australian Penaeid Trawl. *Fisheries Research*, **131-133**, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.07.015>
- [8] 徐宝生, 张勋, 郁岳峰, 王明彦, 陈裕, 李志国, 等. 矩形 V 型曲面网板和 V 型网板生产性对比试验[J]. 海洋渔业, 2006, 28(1): 66-70.
- [9] 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.
- [10] 刘健, 黄洪亮, 陈帅, 吴越, 李灵智, 饶欣. 两种立式曲面 V 型网板水动力性能的实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2014, 29(2): 183-188.
- [11] 庄鑫, 邢彬彬, 许传才, 张国胜. 网板水动力性能研究综述[J]. 渔业现代化, 2015, 42(5): 63-68.
- [12] 刘健, 黄洪亮, 陈帅, 李灵智, 吴越, 徐国栋, 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.
- [13] Kawakami, T. (1953) Mechanical Action of the Otter Board of the Trawl Net. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, **19**, 228-232. <https://doi.org/10.2331/suisan.19.228>
- [14] Matuda, K., Hu, F. and Ishizawa, S. (1990) Hydrodynamic Characteristics of Vertical V Type Otter Board. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1815-1820. <https://doi.org/10.2331/suisan.56.1815>
- [15] Wang, L., Wang, L.M., Yu, W., Feng, C., Shi, J., Liu, Y., et al. (2016) Influence of Deflector Angular Variation on



- Hydrodynamic Performances of Single Slotted Cambered Otter Board. *International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development*, **42**, 55-60. <https://dx.doi.org/10.2991/ifeesd-16.2016.95>
- [16] Takahashi, Y., Fujimori, Y., Hu, F., Shen, X. and Kimura, N. (2015) Design of Trawl Otter Boards Using Computational Fluid Dynamics. *Fisheries Research*, **161**, 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.08.011>
- [17] Xu, Q.C., Huang, L.Y., Zhao, F.F., Wang, X., Tang, Y., Liang, Z., *et al.* (2017) Study on the Hydrodynamic Characteristics of the Rectangular V-Type Otter Board Using Computational Fluid Dynamics. *Fisheries Science*, **83**, 181-190. <https://doi.org/10.1007/s12562-017-1065-5>
- [18] Sala, A., d'Arc Prat Farran, J., Antonijuan, J. and Lucchetti, A. (2009) Performance and Impact on the Seabed of an Existing- and an Experimental-Otter Board: Comparison between Model Testing and Full-Scale Sea Trials. *Fisheries Research*, **100**, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.07.004>
- [19] 陈雪忠, 黄锡昌. 渔具模型试验理论与方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011: 388-425.
- [20] 夏章英, 卢伙胜, 颜云榕, 等. 应用渔具设计学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 23-25.
- [21] Xu, Q.C., Huang, L.Y., Zhao, F.F., Wang, X.X., Tang, Y.L., Liang, Z.L., *et al.* (2017) Effects of Aspect Ratio on the Hydrodynamic Performance of Full-Scale Rectangular Otter Board: Numerical Simulation Study. *Ocean Engineering*, **142**, 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.007>
- [22] Xu, Q.C., Feng, C.L., Huang, L.Y., Xu, J., Wang, L., Zhang, X., *et al.* (2018) A Comparative Study on Hydrodynamic Performance of Double Deflector Rectangular Cambered Otter Board. *Journal of Ocean University of China*, **17**, 1218-1224. <https://doi.org/10.1007/s11802-018-3627-2>
- [23] Xu, Q.C., Feng, C.L., Huang, L.Y., Xu, J.Q., Wang, L., Zhang, X., *et al.* (2018) Parameter Optimization of a Double Deflector Rectangular Cambered Otter Board: Numerical Simulation Study. *Ocean Engineering*, **162**, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.008>
- [24] Xu, Q.C., Huang, L.Y., Liang, Z.L., Zhao, F.-F., Wang, X.-X., Wan, R., *et al.* (2016) Experimental and Simulative Study on the Hydrodynamics of the Rectangular Otter Board. *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering*, Wuhan, 15-17 May 2016, 431-437. <https://dx.doi.org/10.2991/ame-16.2016.71>
- [25] 王明彦, 王锦浩, 张勋, 郁岳峰, 徐宝生. 立式 V 型曲面网板的水动力性能[J]. 水产学报, 2004, 28(3): 311-315.