

DOI: 10.12264/JFSC2025-0051

Nordmøre 栅栏的栅条间距和装配倾角对拖网网囊稳定性的影响

毛达文^{1, 2, 3*}, 唐浩^{1, 2, 3*}, 张灿¹, 胡夫祥^{1, 2, 3}, 许柳雄^{1, 2, 3}

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

摘要: Nordmøre 栅栏是一种广泛用于虾拖网渔业中减少副渔获物的栅型兼捕减少装置, 其栅条间距和栅栏倾角不仅影响网囊结构水动力, 对网囊系统的稳定性也会产生一定影响。本研究通过动水槽模型实验, 探究了栅条间距(15 mm、25 mm、35 mm、45 mm)和栅栏倾角(30°、45°、60°)对网囊系统阻力和形态的影响变化, 结果表明: (1)网囊阻力随着栅栏倾角和流速的增大而增大, 但随栅条间距的增大而减小。不同装配倾角的网囊平均阻力从大到小依次为, Grid-15-60°栅>Grid-15-45°栅>Grid-15-30°栅>无栅栏。无栅栏网囊的平均阻力分别比 Grid-15-60°栅、Grid-15-45°栅和 Grid-15-30°栅小 170%、120%和 72%; (2)随着栅栏倾角的增大, 网囊轮廓形态扩张效果显著, 网囊垂直方向的中心点位置偏低。随着流速增大, 网囊整体形态呈收缩趋势。栅栏倾角为 60°时, 网囊周长较倾角 30°和 45°时分别增大了 18%和 8%; (3)测试中发现, 网囊阻力呈一定程度波动规律, 随流速增大, 网囊阻力振荡效果越显著; Grid-15-60°栅的网囊阻力振荡效果最为显著, Grid-15-45°栅的网囊阻力振荡效果较弱; Grid-15-30°栅的阻力平均振幅较 Grid-15-45°栅增大 26%; (4)栅条间距对网囊阻力振荡影响并不显著。综上, 建议采用栅条间距为 35 mm, 装配倾角为 45°的栅栏结构配置, 以提升网囊系统水动力性能和稳定性。

关键词: 栅型兼捕减少装置; 栅条间距; 倾角; 网囊阻力; 网囊稳定性

中图分类号: S972

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)08-1174-12

当前海洋渔业捕捞中, 以重量和捕获尾数为评价指标的渔业抛弃率统计中, 拖网渔具占据抛弃率最高的 20 种渔业中的 19 种^[1]。这一数据凸显了拖网渔具对海洋生态系统产生的显著负面影响, 可能对海洋生物资源可持续开发利用造成严重威胁。因此, 针对拖网渔具的管理与监管措施显得尤为重要, 许多国家通过开发兼捕减少装置(bycatch reduction devices, BRDs)以改善拖网渔具的选择性, 并在虾拖网渔业中开展了系列实验研究, 取得了阶段性成果^[2]。

Nordmøre 栅栏是一种广泛用于虾拖网渔业中减少副渔获物的栅型 BRD^[3]。其中, 具有代表性的椭圆形和矩形 Nordmøre 栅栏是由刚性框架

和一定间距的栅条组成。20 世纪 90 年代, 加拿大东海岸虾拖网渔业中首次引入 Nordmøre 栅栏, 显著减少了捕捞作业中的副渔获物, 并于 1997 年被列为强制使用的兼捕减少装置^[4-5]。2002—2003 年美国加利福尼亚州、俄勒冈州和华盛顿州均将 Nordmøre 栅栏作为对虾渔业中强制性安装 BRD 类型之一, 以减少海龟、鱼类和其他非目标物种的兼捕^[6]。此外, 挪威于 2000 年颁布了关于虾拖网渔船上分选栅栏形状和安装的指令, 规范了 Nordmøre 栅栏的技术规格和安装要求^[7]。近年来, 许多学者主要通过优化设计 Nordmøre 栅栏结构, 验证其选择性应用效果。Tomas 等^[5]分析了不同栅距的 Nordmøre 栅栏对北方对虾尺寸选择性的

收稿日期: 2025-03-19; 修订日期: 2025-04-16.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401203); 国家自然科学基金项目(32373187); 上海市自然科学基金项目(23ZR1427000).

作者简介: 毛达文(2000–), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具渔法. E-mail: 2260046012@qq.com

通信作者: 唐浩, 教授, 从事渔具水动力研究. E-mail: htang@shou.edu.cn

影响,结果表明,更小栅条间距的栅栏能够显著减少副渔获物,且能增加虾类的捕捞量。Larsen 等^[8]比较了不同栅距 Nordmøre 栅栏对渔获物选择性的影响,发现栅距由 17 mm 增加至 22 mm 时,对北方对虾的选择性无显著影响。Grimaldo 等^[9]对比分析了断面形状为水滴形栅条的新型 Nordmøre 栅栏和圆形 HDPE 栅栏,在其他结构参数相同条件下,水滴形栅条的滤水效果更显著,释放渔获物效果更好。

然而, Nordmøre 栅栏的实际应用效果受多种因素影响。装置的形状、外形尺寸、栅条间距以及在网囊内的装配位置和倾角均会对网囊水动力,特别是网囊系统的稳定性有较大影响,进而影响选择性效果。银利强等^[10]研究表明,随着栅栏横向投影周长与网囊横向拉直周长比值的增大,网囊的平均阻力也随之增大。Zhang 等^[11]探究了不同栅距和装配倾角对栅栏周围水动力的影响,发现栅栏阻力随流速和装配倾角的增大而增大,随栅距的增大而减小。Guan 等^[12]进一步研究发现,栅栏对网囊的水动力产生了显著影响,且网囊装配栅栏后在垂直方向上出现下垂现象。装配 Nordmøre 栅栏不仅会改变网囊结构和形态,还会影响其周围流场分布,加剧网囊振荡现象。网囊振荡会增加网具阻力,进而影响鱼群游泳速度和灵活性,降低拖网选择性^[13]。Kim^[14]认为绳索和网具之间湍流的相互作用会导致网囊振荡发生改变。Druault 等^[15]利用 PIV 技术探究网囊振荡对拖网水动力性能的影响,结果表明,湍流会导致网囊阻力发生周期性振荡,降低网具的稳定性。Thierry 等^[16]认为网囊振荡是其周围流场发生改变所导致。Bouhoubeiny 等^[13]对刚性网囊的尾流效应进行研究,指出在近尾流中交替脱落的涡旋会引起压力变化,进而导致网囊系统发生振荡。

既往对 Nordmøre 栅栏研究主要聚焦于网囊的稳态水动力变化和其选择性效果,而栅栏对网囊振荡特性的影响规律尚不明晰。为探究不同结构和装配参数的 Nordmøre 栅栏对拖网网囊水动力及振荡特性的影响,本研究选择矩形 Nordmøre 栅栏作为研究对象,基于动水槽模型实验,分析布设不同栅条间距和装配倾角的 Nordmøre 栅栏的网囊系统阻力、形态和振荡特性变化,以期优化 Nordmøre 装置,提高拖网渔具选择性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验网囊和 Nordmøre 栅栏结构

实验网囊选取葡萄牙渔船“Noruega”使用装配有 Nordmøre 栅栏的四片式底拖网作为母型网^[17],选取其网囊部分,网囊长度为 6 m。基于修正田内准则^[18],大尺度比 1.5,小尺度比 1,使用聚乙烯菱形网片制作模型网囊,网片的网线结构号数为 30 tex×10×3,模型网囊分为延伸部、设置栅栏的选择部及网囊三个部分,图 1 所示为四片式网囊结构图,实际装配中采用对称缝合制作网囊结构。各部分的参数见表 1 和图 1。

实验选取常用的矩形 Nordmøre 栅栏为母型参照物,尺度比为 1.5 : 1,模型栅栏的规格为长 1.0 m×宽 0.5 m,如图 2 所示。栅栏外框架采用 304 不锈钢材质,栅条采用轻质铝管。实验时在栅栏顶部装配浮子以提供浮力,保持与实际作业状况保持一致。装配倾角为栅栏与水平方向的夹角 A,根据横、纵向缩结长度计算出不同倾角 A 所对应的横纵向目数进行装配。栅栏上部边缘装配于选择部的前部,下部装配于选择部后端下部,设置四种栅条间距 d-15 mm、d-25 mm、d-35 mm 和 d-45 mm,具体参数见表 2。

表 1 网囊网片参数
Tab. 1 Netting configuration parameters of cod-end

网囊 cod-end	网线材质 twine materials	网目尺寸 mesh size	网线粗度 twine diameter	拉直长度 stretched length	剪裁斜率 cutting ratio	纵向目数 number of N-mesh
Part 1	PE	60 mm	1.18 mm	1.2 m	4 : 1	20
Part 2	PE	60 mm	1.18 mm	1.98 m	无	33
Part 3	PE	40 mm	1.18 mm	2.0 m	无	50

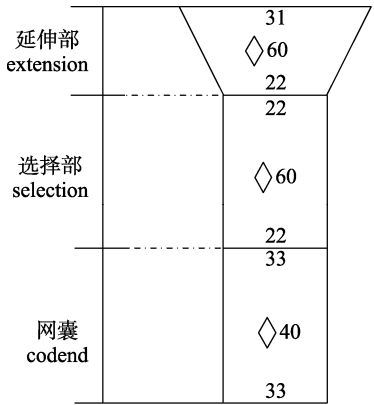


图 1 实验网囊设计图
Fig. 1 Design diagram of the test cod-end

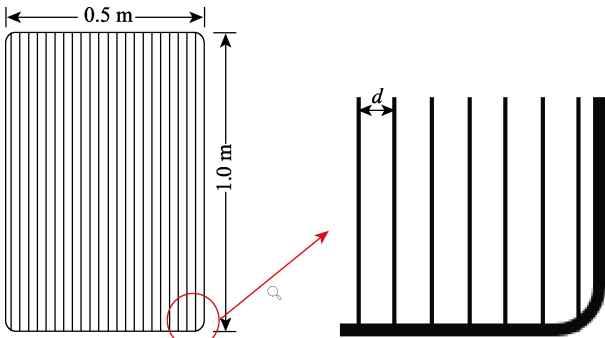


图 2 实验栅栏结构图
d 代表栅条间距
Fig. 2 Structural schematic of the test grid
d indicates bar spacing

表 2 实验栅栏参数
Tab. 2 Test grid parameter

编号 serial number	倾角 angle	栅条间距 bar spacing	纵向目数 number of N-mesh
Grid-15-30°	30°	15 mm	16
Grid-25-30°	30°	25 mm	16
Grid-35-30°	30°	35 mm	16
Grid-45-30°	30°	45 mm	16
Grid-15-45°	45°	15 mm	9
Grid-25-45°	45°	25 mm	9
Grid-35-45°	45°	35 mm	9
Grid-45-45°	45°	45 mm	9
Grid-15-60°	60°	15 mm	5
Grid-25-60°	60°	25 mm	5
Grid-35-60°	60°	35 mm	5
Grid-45-60°	60°	45 mm	5

注: Grid-15-30°表示为栅栏装置的栅条间距为 15 mm, 装配倾角为 30°。
Note: Grid-15-30° is expressed as a grid device with a grid bar spacing of 15 mm and an assembly inclination angle of 30°.

1.2 模型实验条件和流程

模型实验在上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心动水槽中进行, 动水槽实验段长 15.0 m, 宽 3.5 m, 高 2.3 m, 实验设定流速为 0.6 m/s, 0.8 m/s, 1.0 m/s, 实验期间水温为 21 ℃。采用两台录像频率 59 Hz, 分辨率 1920×1080 像素的摄像机记录网囊系统形态变化与网口前部曳纲角度情况。为测量网囊系统阻力, 通过绕缝方式将网囊延伸部前端安装于直径 78 cm 的圆形刚性框架上, 并浸入水下 0.5 m, 刚性框架通过四个连接点与两个 20 kgf 的张力计相连接, 阻力信号通过 A/D 转换器被记录和存储, 记录频率为 100 Hz (图 3)。

实验时, 首先测量圆形空框架在 3 种流速下的阻力值。然后, 将网囊系统绕缝在圆形刚性框架上, 使用相同方法测量 3 种流速空网囊的水阻力, 待网囊状态稳定后, 拍摄 15 s 视频记录其形态变化特征。测试完空网囊后, 分别对 3 种装配倾角和 4 种栅条间距的栅型 BRD 系统重复进行上述实验流程, 直至完成全部测量实验。

1.3 数据处理

网囊形态实验数据由固定位置拍摄的视频资料导入 Pot Player 分析软件, 每 6 帧提取 1 张图片, 获得时间序列图像。然后, 用 Getdata 软件提取图片中网囊轮廓平面坐标信息。最后, 将这些反映网囊形态的坐标进行插值处理, 以确定不同倾角、流速下网囊形态变化。

本研究采用快速傅里叶变换方法(FFT), 对网囊阻力信号的频谱进行评估, 在傅里叶变换谱分析过程中, 为了提高统计收敛性, 采用 Welch 和 Hann 方法计算谱^[19]。有限函数 $\Psi(t)$ 的离散时间序列的 FFT 可研究全局谱行为, 并能够提取频域内随机现象的波动输入信号特征, 定义为:

$$\Psi(f) = \frac{1}{2n} \sum \Psi(t) e^{-ift} \quad (1)$$

所得信号在整个时间的频域能量分布的傅里叶功率谱为:

$$P_{xx}(f) = |\Psi(f)|^2 \quad (2)$$

其中 $\Psi(t)$ 是时域的泛函数, $\Psi(f)$ 是傅立叶域中的泛函数, f 是频率, $P_{xx}(f)$ 是傅立叶频谱^[20]。

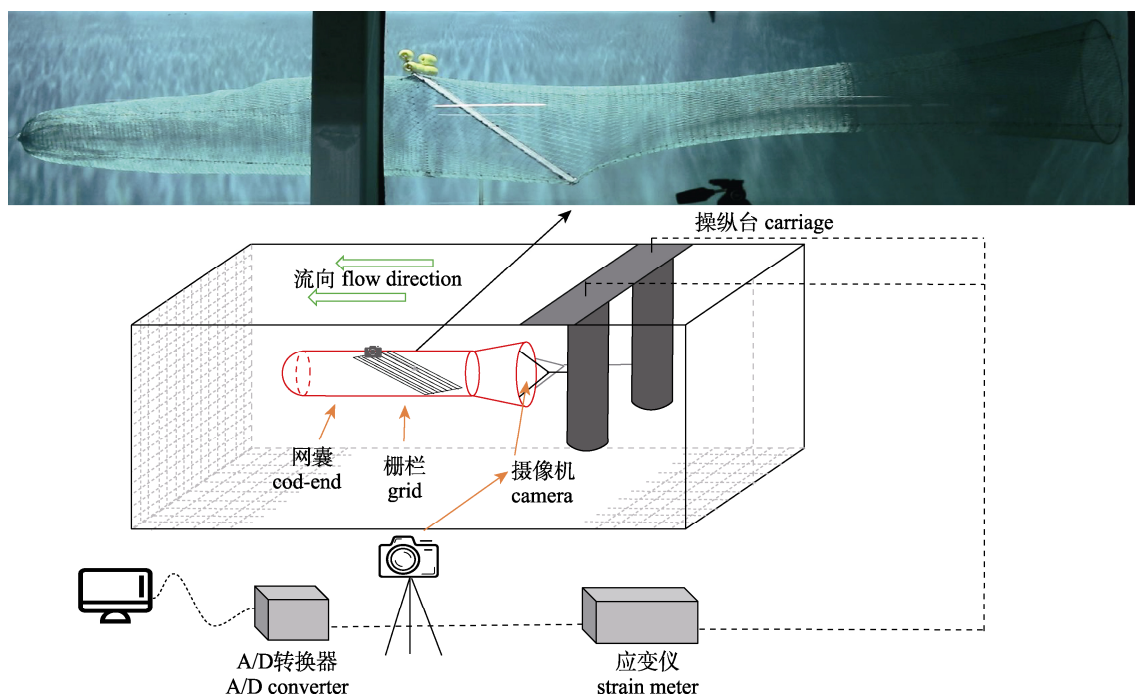


图 3 动水槽与仪器设备
Fig. 3 Flume tank and equipment

根据 MATLAB 处理后的数据结果, 绘制出阻力的频率与振幅之间的关系图。

2 结果与分析

2.1 网囊系统阻力

图 4 表明, 网囊阻力随流速的增大而增大, 随着栅条间距的增大而减小。随着流速的增加, 不同栅距栅栏之间的网囊系统阻力差值增大。相较于无栅栏网囊, 装配栅栏后网囊系统阻力显著增加, 在 0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s 三个流速下, Grid-15-45° 栅条件下的网囊阻力相较于无栅栏网囊分别增大了 180%、120%、110%, Grid-25-45° 栅的网囊阻力分别增大了 160%、105%、93%; Grid-35-45° 的网囊阻力分别增大了 170%、107%、91%; Grid-45-45° 栅的网囊阻力分别增大了 150%、100%、84%。相较于其他的栅距, Grid-15-45° 栅条件下的网囊阻力最大。如图 5 所示, 在各流速条件下, Grid-15-45° 栅的网囊系统阻力方差最大, 表明该栅距条件下网囊阻力变化幅度最大, 波动性最强。

网囊阻力随流速和装配倾角的增大而增大。随着流速的增大, 不同装配倾角栅栏之间的阻力

差值增大(图 6)。与无栅栏网囊相比, 在 0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s 三个流速下, Grid-15-30° 栅条件下的网囊系统阻力分别增大了 120%、73%、60%; grid-15-45° 栅的网囊系统阻力分别增大了 180%、120%、107%; Grid-15-60° 栅的网囊系统阻力分别增大了 230%、170%、150%。如图 7 所示, 在各流速条件下, Grid-15-30° 栅的网囊系统阻力方差最大, 表明在该装配倾角条件下网囊系统阻力变化最剧烈。

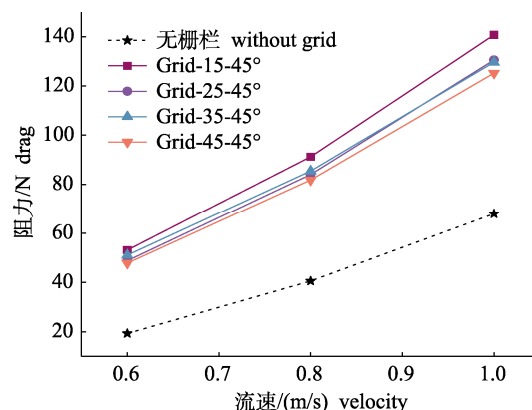


图 4 各流速条件下不同栅条间距的网囊系统阻力变化
Fig. 4 Variation of cod-end system drag with flow velocity at different grid bar spacing settings

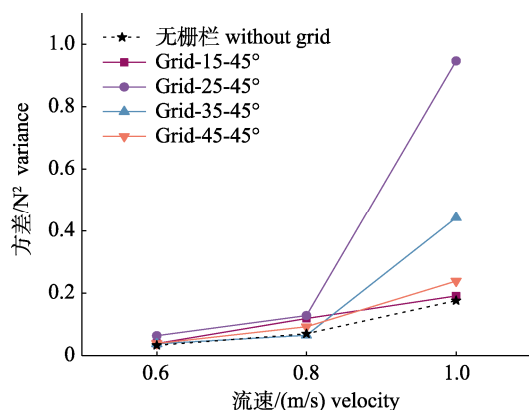


图 5 各流速条件下不同栅条间距的网囊系统阻力方差变化

Fig. 5 Variation of cod-end system drag variance with flow velocity at different grid bar spacing settings

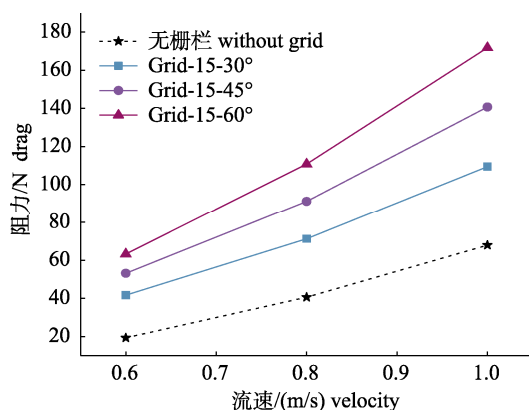


图 6 各流速条件下不同倾角的网囊系统阻力变化

Fig. 6 Variation of cod-end system drag with flow velocity at different inclination angle settings

2.2 网囊系统形态

栅栏的倾角随着流速的增大而减小, 但栅栏倾角的减小幅度随初始装配倾角增大而减小

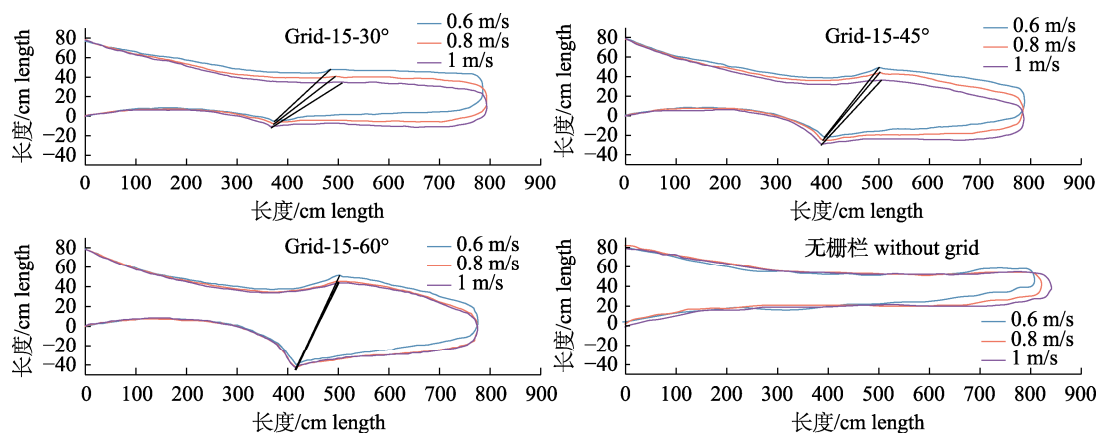


图 8 各流速条件下不同倾角的网囊形态变化

Fig. 8 Variation of the shape of the cod-end with flow velocity at different inclination angle settings

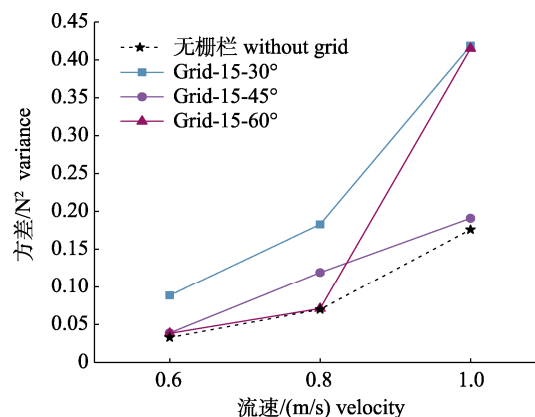


图 7 各流速条件下不同倾角的网囊系统阻力方差变化

Fig. 7 Variation of cod-end system drag variance with flow velocity at different inclination angle settings

(图 8)。Grid-15-60° 栅条件下的网囊周长较 Grid-15-30° 栅和 Grid-15-45° 栅分别扩张了 18% 和 8%。随着流速增大, 网囊系统中心点位置在垂直方向上偏低, 网囊整体形态呈收缩趋势, 且收缩程度随栅栏装配倾角的减小而增大。在相同流速下, 网囊中部收缩和后部扩张效果随栅栏装配倾角的增大越显著, 网囊的垂直位置随装配倾角的增大而降低, 降低程度 Grid-15-60° 栅 > Grid-15-45° 栅 > Grid-15-30° 栅。从网囊形态看, 栅栏初始装配倾角越大, 流速对栅栏的倾斜角度影响越小。

2.3 装配倾角对网囊阻力振荡的影响

图 9 为 3 种不同栅栏装配倾角下网囊系统阻力的频率—振幅变化, 结果显示, 网囊阻力呈一定程度的规律波动, 并且其阻力振幅随流速增大而增大。Grid-15-30° 栅条件下的网囊阻力振幅均值分别为 Grid-15-45° 栅、Grid-15-60° 栅和无栅栏

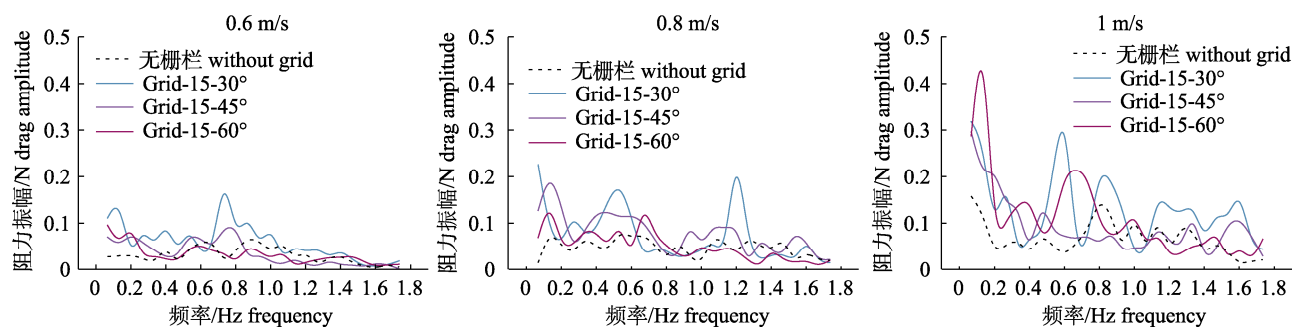


图 9 不同倾角下网囊系统阻力振幅

Fig. 9 Drag amplitude of cod-end system at different inclination angle settings

条件下的 1.26 倍、1.37 倍和 1.8 倍(图 10)。此外,随着流速增加, Grid-15-30° 栅和 Grid-15-60° 栅的振幅均值增加速度明显快于 Grid-15-45° 栅。在相同流速条件下,随着装配倾角增大,网囊阻力振荡幅值呈减小趋势, Grid-15-30° 栅的网囊阻力振荡效果最为显著; Grid-15-45° 栅的网囊阻力振荡效果较为微弱。不同装配倾角栅栏的网囊阻力振幅峰值集中在频率为 0.1~0.9 Hz, 此时网囊阻力振荡最为剧烈, 在频率 1.0~1.5 Hz 时, 网囊阻力振荡逐渐趋于稳定。

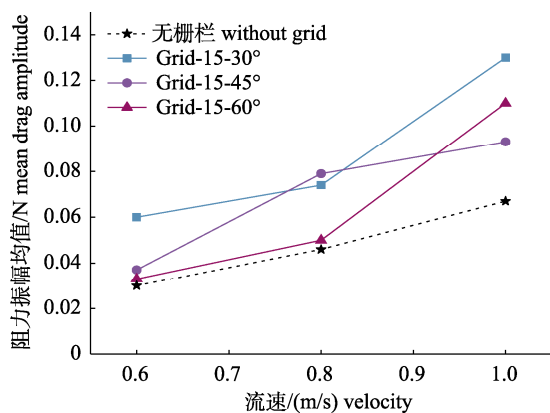


图 10 不同倾角下网囊系统阻力振幅变化

Fig. 10 Variation of drag amplitude of cod-end system with different inclination angle settings

基于 FFT 方法获取装配不同倾角栅栏的网囊振荡功率谱图。发现在不同流速条件下, 振荡功率随频率增大呈降低趋势, 其振荡功率峰值出现在低频区域(图 11)。流速增大导致功率谱的增加, 增大了阻力波动。从网囊阻力的 FFT 结果中可知, 装配不同倾角栅栏的网囊表现出周期振荡规律。

2.4 栅条间距对网囊阻力振荡的影响

图 12 为 4 种不同栅条间距下网囊系统阻力的频率—振幅变化。网囊阻力振幅峰值主要集中在低频范围 0.1 Hz~1.0 Hz 内。随着流速增大, 网囊系统阻力振荡频率和振幅均有所增加。当流速为 0.6 m/s 和 0.8 m/s 时, 栅条间距对网囊阻力变化无显著影响, 不同栅条间距栅栏的网囊阻力振荡幅值无显著差异。然而, 当流速增至 1.0 m/s 时, 栅条间距对网囊阻力振荡的影响增大。通过计算不同栅条间距网囊的平均阻力振荡幅值, 发现在 Grid-25-45° 栅条件下, 网囊系统阻力振幅最为明显, 振幅峰值最大, 分别为 Grid-15-45° 栅、Grid-35-45° 栅、Grid-45-45° 栅和无栅栏条件下网囊阻力振荡幅值的 1.26 倍、1.54 倍、1.8 倍和 1.75 倍(图 13)。基于 FFT 方法获取不同栅距栅栏的网囊振荡功率谱图。在不同流速条件下, 振荡功率随频率增大呈降低趋势, 其振荡功率峰值出现在低频区域(图 14)。

3 讨论

3.1 栅栏装配倾角和栅条间距的设置

栅栏的装配倾角会改变网囊系统的水动力性能, 进而影响栅型 BRD 的选择性效果。Larsen 等^[3]认为, 在不改变栅栏形状结构的情况下, Nordmøre 栅栏在网囊内的装配倾角对选择性的影响最为明显。本研究发现, 网囊系统阻力随着栅栏装配倾角的增大而增大, 可能是因为随着装配倾角的增大, 栅栏的迎流面积也随之增加, 进而导致网囊系统阻力增大。Isaksen 等^[4]认为, 栅栏装配倾角

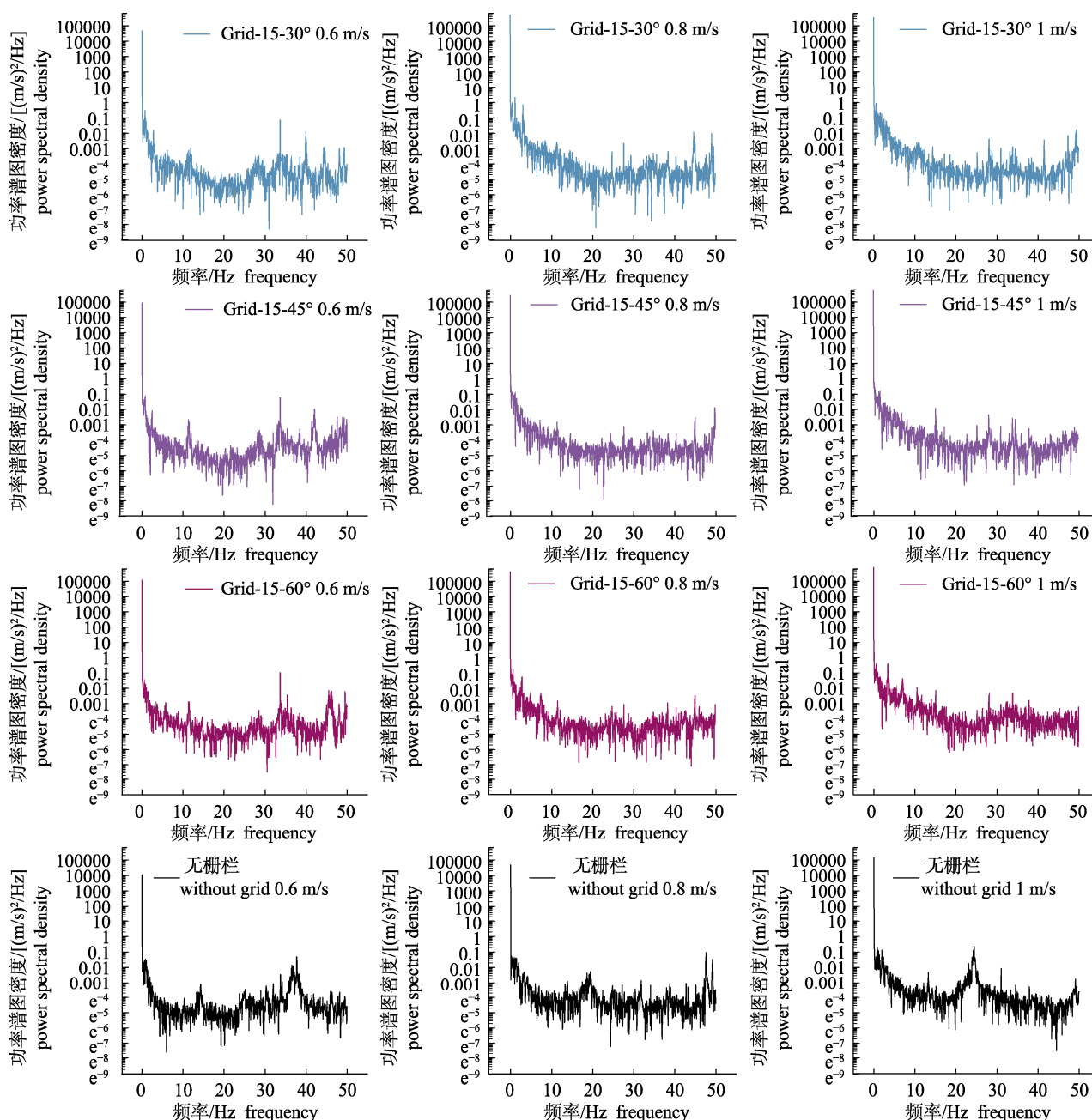


图 11 各流速条件下不同倾角的网囊系统阻力频谱

Fig. 11 Frequency spectrum of the cod-end system drag at different inclination angles settings under different flow velocities

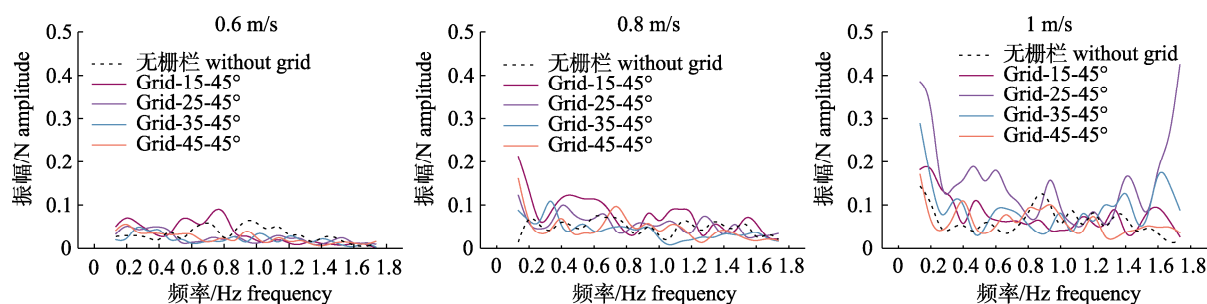


图 12 不同栅条间距网囊系统阻力振幅

Fig. 12 Drag amplitude of cod-end system at different grid bar spacing settings

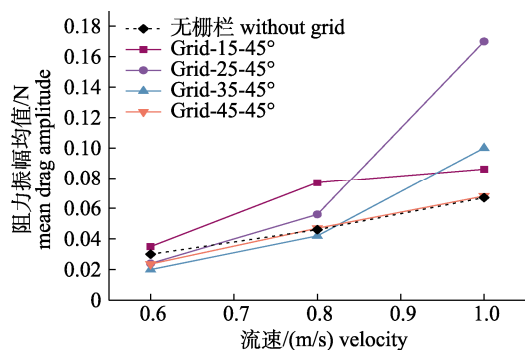
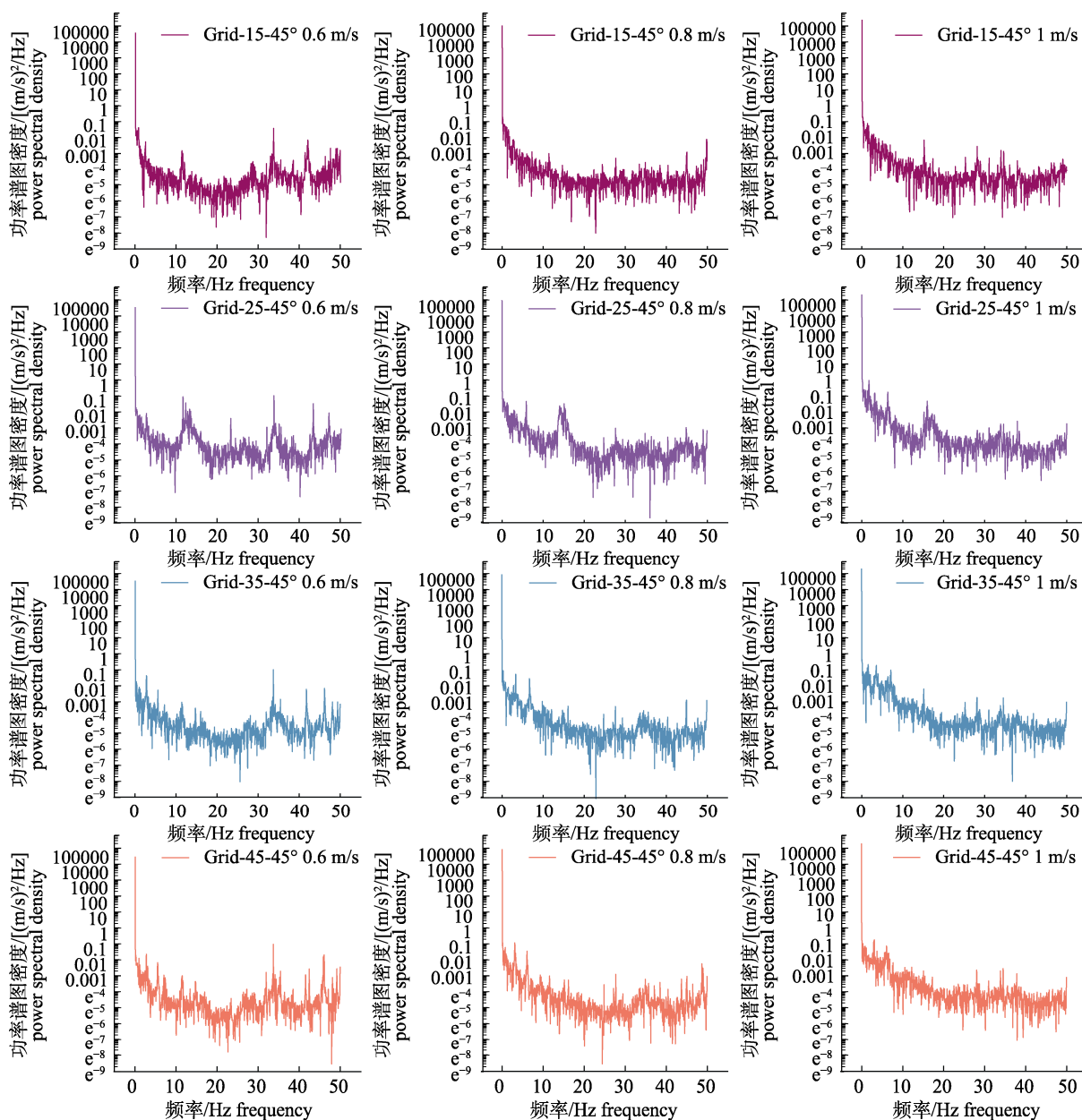


图 13 不同栅条间距下网囊系统阻力振幅变化
Fig. 13 Variation of drag amplitude of cod-end system at different grid bar spacing settings

低于 35° 或高于 55° 时, 均会增加虾类的逃逸率。Grimaldo 等^[9]研究表明, 较低角度栅栏会增加幼鱼的逃逸率和虾类的损失率, 推荐最佳作业角度是在 38° 到 40° 之间。此外, 也有研究提出栅栏最佳安装角度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间^[21]。本实验结果表明, 栅栏在装配倾角为 45° 时网囊系统最为稳定, 因此, 基于网具系统稳定性角度推荐栅栏的装配倾角为 45° , 与 Grimaldo 推荐的倾角范围 $38^\circ \sim 40^\circ$ 存在差异^[9]。这可能是因为栅栏装配倾角较低时, 网囊的阻力尽管较小, 但所需栅条的长度随之增加,



(待续 to be continued)

(续图 14 Fig. 14 continued)

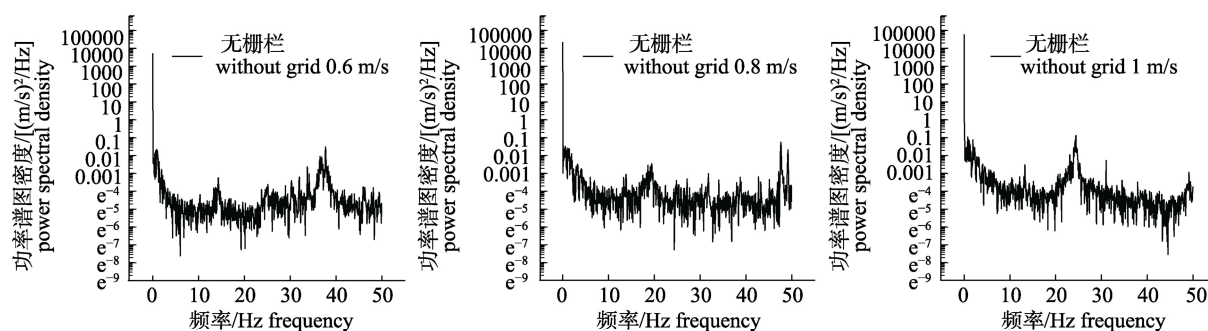


图 14 各流速条件下不同栅条间距的网囊系统阻力频谱

Fig. 14 Frequency spectrum of the cod-end system drag at different grid bar spacing settings under different flow velocities

虽有可能提高幼鱼的释放率,但虾类的逃逸率也会随之增加^[22];且由于更多的水流向上重新定向,通过栅栏上方逃逸出口的流量增加,栅栏在低角度时的不稳定性。因此,在栅栏倾角的选择上应避免过低或过高的设置,以平衡网囊的水动力性能表现与副渔获的减少问题。

扩大网目尺寸是提高拖网网囊选择性的有效方法^[23],而刚性栅栏的装配倾角在一定程度上会改变网囊的网目大小。适当增加栅栏的装配倾角,有助于提升网囊网目的扩张效果,从而可提高幼鱼的释放效果。装配倾角不仅改变网囊网目大小,对网囊在垂直方向上的位置也会产生影响。本实验结果表明,随着流速增大,网囊系统中心点的上下位置偏移幅度随栅栏倾角的增大而减小,这可能是由于装配倾角增大后,水流在栅栏垂直方向上的作用力减小,导致网囊在垂直方向上的位置偏移较小。

除栅栏倾角外,栅条间距也影响着网囊系统的水动力性能。Veiga^[24]等通过风洞实验对比 4 种不同横截面积栅条对栅栏水动力性能的影响,发现当栅栏孔隙率较低时,通过栅栏的流量减少,尤其是栅条的长宽比较小时,会增加流体阻力。本研究发现,网囊系统阻力随栅距的增大而减小,这与 Veiga^[24]的结果一致。其中,25 mm 和 35 mm 栅距栅栏之间的网囊阻力无显著差异,可能是由于栅距从 25 mm 增加到 35 mm 时,在相对较小的间距差异下,通过栅栏的水流流动模式变化较小,未呈现出显著差异。不同目标物种对栅距的适应性存在差异性,当栅条间距在 15 mm 至 25 mm 范

围时,对虾类有较好的分隔性能^[22];Tomas 等^[5]发现较小的栅距能够有效减少鲑鱼等副渔获物,但也可能导致较大且更有价值的对虾捕获率下降。而王忠秋^[25]研究表明,随着栅距增大,渔获释放效果也随之增加。因此,缩小栅距的机械分离并非减少副渔获的最终解决方案,应该结合物种之间的行为差异,与其他 BRD 组合使用,以实现减少副渔获物目标。

3.2 装配刚性栅栏的网囊振荡特性

网囊的振荡特性主要受到以下因素的影响:(1)由流速波动、尾流脱落等局部水动力效应引起的振动;(2)由网线张力变化引起的振动;(3)由可变形结构本身的运动引起的振动^[26]。周期性尾流脱落会产生周期性的流体力,若脱落频率与网囊结构的固有频率重合,会发生共振现象,如果振动响应足够大,控制了尾流脱落的机制,则周期性力将与模态形状在空间上相关,从而导致较大的振荡产生^[27]。本研究发现,在相同流速条件下,刚性栅栏的装配倾角为 30°时,网囊阻力振荡最剧烈;装配倾角为 45°时,网囊阻力振荡最微弱,表明装配倾角为 45°时网囊稳定性最佳。这可能是因为在较小的装配倾角时,网囊周围存在的周期性尾流脱落的强度较大,容易激发共振现象,使网囊阻力变化较剧烈。而在 45°时,通过栅栏的水流分布较为均匀,减少了网囊内部的周期性尾流脱落和内部的紊流强度,降低了网囊整体的振荡水平。Liu 等^[28]研究发现,网囊阻力振荡周期随流速增加而减小,振幅随流速的增加而增大。本研究显示,网囊阻力振幅随流速的增加而增大,

这与 Liu 等^[28]的结果基本一致。Klebert 等^[29]研究表明,网囊系统的上下振荡会使水流更容易通过网囊,从而引起网目张开的周期性变化,这影响了网囊的滤水性,进而导致网囊的振荡幅度发生变化。网囊振荡不仅受流速和网线张力影响,还与其本身的结构特性密切相关,且网囊末端的振荡对网具的选择性有显著性影响^[30]。为减小装配刚性栅栏后网囊的振荡并提高其稳定性,应根据不同目标渔获物优化栅栏装配倾角,以减小网囊振荡。通过改进网囊结构设计,增强网囊材料的刚性和优化网目分布,降低振荡幅度,并结合渔获物分布特征,调整网囊内部空间布局,减少渔获物堆积对水流的阻碍作用,提高网囊稳定性。

刚性栅栏是目前应用广泛的 BRD 类型之一,其优势在于结构稳定性强,可通过调节装配倾角和栅距实现目标物种与非目标物种的有效分离。但实际作业中海况复杂,刚性栅栏不易收叠,在起放网过程中易因机械碰撞或渔获物堆积导致结构变形,增加维护成本。为突破刚性栅栏的局限性,未来可探索半刚性 BRD 的应用潜力。半刚性 BRD 可通过自适应水流变化调整局部倾角与网目大小,从而降低网囊阻力,且半刚性 BRD 的折叠特性可简化起放网操作,减少渔具收纳空间。但半刚性 BRD 的挑战在于其力学稳定性与耐久性,需通过材料力学模拟和海上实验验证其长期抗疲劳性能和实际应用效果。

参考文献:

- [1] Alverson D L, Freeberg M H, Murawski S A, et al. A global assessment of fisheries bycatch and discards[R]. Rome: FAO Fisheries Technical Paper, 1994, 339: 163-170.
- [2] Zhang J, Sun M C. Progress in research on selective shrimp trawls in Europe[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(1): 55-62. [张健, 孙满昌. 欧洲地区选择性虾拖网渔具的研究进展[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 55-62.]
- [3] Larsen R B, Sistiaga M, Herrmann B, et al. The effect of Nordmøre grid length and angle on codend entry of bycatch fish species and shrimp catches[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2019, 76(2): 308-319.
- [4] Isaksen B, Valdemarsen J W, Larsen R B. Reduction of fish bycatch in shrimp trawl using a solid separator grid in the aft belly[J]. Fisheries Research, 1992, 13(3): 335-352.
- [5] Araya-Schmidt T, Bayse S M, Winger P D, et al. Smaller bar spacings in a Nordmøre grid reduces the bycatch of redfish (*Sebastes* spp.) in the offshore Northern shrimp (*Pandalus borealis*) fishery of eastern Canada[J]. Aquaculture and Fisheries, 2023, 8(6): 661-671.
- [6] Frimodig A. Informational report: Bycatch reduction devices used in the pink shrimp trawl fishery[R]. California: California Department of Fish and Game, 2008: 2.
- [7] Norwegian Directorate of Fisheries. Directive No.968 of 2000 relative to the shape and installation of sorting grids on shrimp trawlers[R]. Bergen: Norwegian Directorate of Fisheries, 2000: 3-5.
- [8] Larsen R B, Herrmann B, Sistiaga M, et al. Effect of the Nordmøre grid bar spacing on size selectivity, catch efficiency and bycatch of the Barents Sea Northern shrimp fishery[J]. PLoS One, 2022, 17(12): e0277788.
- [9] Grimaldo E. The effects of grid angle on a modified Nordmøre-grid in the Nordic Shrimp Fishery[J]. Fisheries Research, 2006, 77(1): 53-59.
- [10] Yin L Q, Tang H, Xu L X, et al. Effects of size and grid angle of sorting grid on the hydrodynamic performance and shape of trawl codend[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(3): 196-206. [银利强, 唐浩, 许柳雄, 等. 栅型兼捕减少装置的规格和倾角对网囊水动力及形态的影响[J]. 水产学报, 2024, 48(3): 196-206.]
- [11] Zhang C, Tang H, Thierry N N B, et al. Flow field pattern and hydrodynamic characteristics of a grid device made with various grid bar spacings at different inclination angles[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(10): 1966.
- [12] Guan Q L, Zhu W B, Feng C L, et al. Hydrodynamic interactions between a sorting grid and a demersal trawl[J]. Ocean Engineering, 2024, 304: 117837.
- [13] Bouhoubeiny E, Germain G, Druault P. Time-Resolved PIV investigations France of the flow field around cod-end net structures[J]. Fisheries Research, 2011, 108(2-3): 344-355.
- [14] Kim Y H. Fluttering characteristics of the ropes and nets as an active stimulating device inside the cod end of a trawl net[J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2013, 16(2): 101-108.
- [15] Druault P, Germain G. Analysis of hydrodynamics of a moving trawl codend and its fluttering motions in flume tank[J]. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2016, 60: 219-229.
- [16] Thierry N N B, Tang H, Xu L X, et al. Identifying the turbulent flow developing inside and around the bottom trawl by Electromagnetic Current Velocity Meter approach in the

- flume tank[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(3): 636-656.
- [17] Fonseca P, Campos A, Mendes B, et al. Potential use of a Nordmøre grid for by-catch reduction in a Portuguese bottom-trawl multispecies fishery[J]. *Fisheries Research*, 2005, 73(1-2): 49-66.
- [18] Chen M X, Xu L X, Tang H, et al. Factors influencing the trawling status of Antarctic krill fishery based on multivariate analysis[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(1): 144-154. [陈明鑫, 许柳雄, 唐浩, 等. 基于多元变量的南极磷虾拖网作业状态影响因素分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(1): 144-154.]
- [19] Zhang F, Tang H, Liu W, et al. Comparative analysis of dynamic stability characteristics of T0 and T90 codends[J]. *South China Fisheries Science*, 2023, 19(4): 21-30. [张锋, 唐浩, 刘伟, 等. T0 和 T90 网囊动稳特性比较分析[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(4): 21-30.]
- [20] Liu W. Study on oscillation and stability of mid-trawl codend[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023. [刘伟. 中层拖网网囊振荡及其稳定性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.]
- [21] Eayrs S. A Guide to Bycatch Reduction in Tropical Shrimp-Trawl Fisheries[M]. Rome: FAO, 2007: 108.
- [22] Zhang J, Shi J G, Zhang P, et al. Separating performance for shrimps of sorting grid rigged in beam trawls[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(6): 726-733. [张健, 石建高, 张鹏, 等. 桁拖网渔具刚性栅栏对虾类的分隔性能[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(6): 726-733.]
- [23] Roda P, Gilman E, Huntington T, et al. A Third Assessment of Global Marine Fisheries Discards[M]. Rome: FAO, 2019: 78.
- [24] Veiga-Malta T, Breddermann K, Feekings J P, et al. Understanding the hydrodynamics of a size sorting grid in a crustacean fishery[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 198: 106961.
- [25] Wang Z Q. Application study of Y-shaped juveniles exclusion devise in the East China Sea offshore stow net fisheries[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [王忠秋. Y 型幼鱼释放装置在东海近海张网渔业中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [26] Blevins R D, Saunders H. Flow induced vibration[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1979, 101(1): 6.
- [27] Pettigrew M J, Taylor C E, Fisher N J, et al. Flow-induced vibration: Recent findings and open questions[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 185(2-3): 249-276.
- [28] Liu W, Tang H, You X X, et al. Effect of cutting ratio and catch on drag characteristics and fluttering motions of midwater trawl codend[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 256.
- [29] Klebert P, Lader P, Gansel L, et al. Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: A review[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58: 260-274.
- [30] O'Neill F G, McKay S J, Ward J N, et al. An investigation of the relationship between sea state induced vessel motion and cod-end selection[J]. *Fisheries Research*, 2003, 60(1): 107-130.

Effects of bar spacing and inclination angles of Nordmøre grid on the stability of the trawl cod-end

MAO Dawen¹, TANG Hao^{1, 2, 3*}, ZHANG Can¹, HU Fuxiang^{1, 2, 3}, XU Liuxiong^{1, 2, 3}

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The Nordmøre grid is an extensive implemented grid bycatch reduction device (BRD) implemented in various shrimp trawl fisheries to reduce bycatch. Variations in the bar spacing and inclination angle of the grid not only affect the hydrodynamic force of the cod-end system but also have a significant impact on the stability. This study employs flume tank model experiments to explore the effects of different bar spacing (15 mm, 25 mm, 35 mm, and 45 mm) and inclination angles (30°, 45°, and 60°) on the drag and shape of the cod-end system. The results showed that: (1) the drag of the cod-end increased as the grid's inclination angle and flow velocity increased but decreased as the bar spacing increased. The average drag of the cod-end in different inclination angles was in the order: A-60° > A-45° > A-30° > without a grid. The drag of the cod-end of the without grid was reduced by 170%, 120%, and 72% compared to that at A-60°, A-45°, and A-30°. (2) As the inclination angle of the grid increased, the expansion effect on the contour morphology of the cod-end became significant, with the vertical center point of the cod-end positioned lower. As the flow velocity increased, the overall shape of the cod-end tended to contract. The cod-end circumference with inclination angle of A-60° was increased by 18% and 8% compared to that with inclination angles of A-30° and A-45°. (3) Experimental observations revealed that the drag of the cod-end exhibited a certain degree of fluctuation, becoming more pronounced with increasing flow velocity. At a grid inclination angle of 30°, the drag oscillation effect was the most significant, while at an inclination angle of 45°, the drag oscillation effect of the cod-end was weaker. The average amplitude of the drag oscillation at 30° inclination angle was increased by 26% compared to that at 45°. (4) Bar spacing did not have a significant impact on the fluctuation of drag oscillation. The outcomes of this study hold substantial implications for the optimized design of grid BRDs, which will enhance the selectivity of trawl nets.

Key words: sorting grid; bar spacing; inclination angle; cod-end drag; cod-end stability

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