

DOI: 10.11964/jfc.20211013114

模拟渔获物重量对网囊水动力和振荡特性的影响



唐浩^{1,2,3,4,5}, 张锋¹, 刘伟¹, 叶旭昌^{1,2*}, 胡夫祥⁶,
许柳雄^{1,2,3,4,5}

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, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 4. 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; 5. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306; 6. 东京海洋大学海洋科学学院, 东京 108-8477

摘要:

【目的】为了更好地了解中层拖网网囊的水动力特性和囊内渔获物重量变化之间的关系。

【方法】实验通过动水槽模型探究 4 种不同重量渔获物(渔获物重量 0.00 kg、渔获物重量 1.68 kg、渔获物重量 3.36 kg 和渔获物重量 5.04 kg)分别在流速 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 m/s 共 5 种状态下对网囊稳定性、阻力、形态和体积的影响效果。

【结果】①网囊结构水阻力随着渔获物重量的增加而增大, 随着流速的增大而增大, 其中在低流速时, 模拟渔获物重量每增加 1 倍(1.68 kg), 其网囊水阻力增加值约为空网的 30%。②网囊结构形状随着流速的增大呈逐渐收紧趋势, 而随着渔获物重量的增加, 网囊结构充盈, 并造成导鱼区收紧, 呈“腰鼓”形状。③网囊体积与渔获物的大小成正比, 当渔获物重量增加到 5.04 kg 时, 网囊体积约为空网时的 0.8 倍。本研究发现, 网囊水阻力与模拟渔获物重量呈正相关关系; 空网时网囊体积最大, 而随着渔获物重量的增加网囊体积减小。存在模拟渔获物的网囊, 无论纵向位移还是阻力都存在明显波动现象。采用 3 级傅里叶级数拟合网囊纵向位移振荡, 拟合效果较好。

【结论】本研究可为优化网囊结构、提高网囊水动力和形态特性, 改善网囊选择性提供基础科学数据。

关键词: 网囊; 阻力特性; 振荡特性; 渔获物重量; 形态

第一作者: 唐浩, 从事渔具水动力研究, E-mail: htang@shou.edu.cn

通信作者: 叶旭昌, 从事渔具渔法研究, E-mail: xcye@shou.edu.cn



资助项目: 国家自然科学基金(32373187); 上海市自然科学基金(23ZR1427000)

收稿日期: 2021-10-19

修回日期: 2022-03-22

文章编号:

1000-0615(2025)05-059716-13

中图分类号: S 972.13

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

拖网是海洋捕捞业的主要作业方式之一, 因捕捞对象广泛、作业范围广, 在渔业生产中占有相当重要的地位^[1]。拖网的作业原理是利用渔船拖曳一囊袋形网具, 驱使鱼群集中在网囊, 从而达到捕捞目的^[2]。其中, 中层拖网或变水层拖网, 是通过调节控制网具在不同水层, 使网口对准鱼群, 将其拖捕进网并聚集到网囊, 是捕捞集群性中上层鱼



类的主要方式之一^[3]。网囊作为拖网渔具的重要组成部分^[4], 其水阻力和动态特性随着海上工况变化和渔获物的不断堆积, 易发生变化。Bouhoubeiny 等^[5]利用 PIV 技术, 在对网囊尾流效应及周围流场测试中, 使用了半球形帽和注水气球代替真实渔获物, 结果显示, 模型网囊整体阻力大于实际阻力, 且网囊振荡效果较为明显。Madsen 等^[6]在探究不同网目类型对网囊水动力及振荡的研究中, 采用了小体积注水袋代替渔获物, 造成了网囊整体阻力小于实际阻力。此外, 网具本身属性参数和捕捞操作参数也会对网囊的水动力性能产生较大影响。王永进等^[1]对我国大网目拖网渔具研究进展与应用现状开展研究, 指出网目尺寸直接关系到网囊的滤水性能, 在不造成捕捞对象逃逸的前提下, 应尽量增大网目尺寸以减小网具阻力。Kim^[7]研究发现, 网目尺寸和开口程度是影响网囊滤水性, 引起阻力变化的主要原因。陆奇巍^[8]对智利竹筴鱼 (*Trachurus murphyi*) 中层拖网网具性能开展研究, 建议在保证网衣强度的条件下, 网线直径越小, 网具阻力越小, 捕捞效果越好。藏迎亮等^[9]对过滤性网渔具网囊网目扩张性能开展研究, 结果显示拖网网囊水阻力随着拖速的增加而增加。

网囊结构的局部水动力效应、网目尺寸及网囊本身形态变化除对网囊阻力特性产生影响, 还会对网囊周围流场分布产生较大影响, 从而引起网囊振荡现象产生^[10]。Druault 等^[11]认为, 网囊常因湍流发生振荡, 从而增加阻力并降低稳定性。Jones 等^[12]认为水流流经网囊使其产生位移, 阻碍了水流直接通过网囊, 从而引起振荡, 并影响渔获质量。Pichot 等^[13]使用激光多普勒测速 (LDV) 和粒子图像测速 (PIV) 技术研究网囊周围流场时发现, 振荡直接影响着网囊周围的流场分布, 并证实了网囊尾部存在上下对称的涡旋。Druault 等^[14]采用 PIV 技术研究网囊周围流场分布时发现, 网囊尾部会产生涡旋, 涡旋脱落会对网囊尾部产生压力致使网囊振荡。拖网网囊在渔获堆积过程中的水阻力以及动态特性的研究, 对于提高拖网作业性能十分重要。拖网作业过程需要保持相对稳定的状态, 以减小网囊随着渔获物逐渐堆积而产生的振荡, 导致渔获物表皮破损, 影响渔获物质量^[15-16]。

Thierry 等^[17]利用电磁流速计对底拖网周围

流场分布进行研究, 认为网囊周围流场发生改变时, 网囊产生的振荡会影响渔获物质量和网囊整体性能。Liu 等^[18]在循环动水槽中对比 6 顶剪裁斜率不同的网囊的水阻力, 结果显示, 当网囊存在渔获物时, 各网囊的平均水阻力均随流速的增加而增大。Priour 等^[19]认为网囊振荡以及形态变化主要取决于渔获物重量和网目形状。O'Neill 等^[20]通过理论分析发现, 网囊会因渔获物的堆积, 前部网目闭合, 尾部形态隆起, 水阻力变大。Bouhoubeiny 等^[5]对刚性网囊的尾流效应开展研究, 认为存在渔获物的网囊, 无论纵向位移还是阻力都存在明显振荡现象, 指出网囊尾部振荡可能是由于网囊尾部产生的涡旋脱落, 导致产生垂直水流方向的压力而产生的。Madsen 等^[6]设置 6 种网目结构不同的网囊, 测试其网目张开效果和网囊稳定性, 发现网囊在存有渔获物的情况下, 会产生明显振荡。

虽然上述有关研究均表明渔获物对网囊水动力特性有一定影响, 但缺少对彼此关系的定量分析。为此, 本研究针对中层拖网网囊, 在动水槽中按空网和不同重量模拟渔获物 4 种状态, 并在 5 种流速条件下进行模型试验, 比较其形态、振荡特性和水阻力的差异, 探究渔获物重量对网囊动态特性和水阻力的影响规律, 为优化网囊结构、提高网囊水动力和形态特性, 实现高效稳定的中层拖网作业提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 实验网囊

模型网囊的原型是我国南极磷虾捕捞船“龙腾”轮使用的四片式拖网, 网囊长度为 30 m, 网目尺寸为 144 mm。设定大尺度比 $\lambda = 20$, 小尺度比 $\lambda' = 5$, 并根据修正田内准则进行换算^[21-22]制作模型网囊, 具体结构参数见表 1。模型试验网囊为 4 片式结构, 由 2 部分构成, 第 1 部分周长 80 目, 第 2 部分周长 32 目 (图 1)。

表 1 网囊规格及参数

Tab. 1 Specifications and parameters of experiment for codend

网囊 codend	网线材料 twine material	目脚长度/mm bar length	剪裁斜率 cutting ratio
第一部分 part 1	尼龙	15	无剪裁斜率
第二部分 part 2	尼龙	15	4 : 1

1.2 模拟渔获物

模拟渔获物的选取参考 Thierry 等^[23]的方法, 采用注水乒乓球作为模拟渔获物, 探究渔获物对网囊流场影响的方法。为了从物理实验角度, 探究模拟渔获物重量的量级变化对网囊阻力、形态和振荡的影响效果, 为渔具基础研究作补充。本研究采用注水乒乓球来代替渔获物, 乒乓球直径为 (4.0 ± 0.1) cm, 空气中重量为 2.40~2.53 g, 注水乒乓球密度与水槽中水的密度相同, 约为 1×10^3 kg/m³。实验共设置 4 种模拟渔获物条件, 为 0、50、100 和 150 个注水乒乓球, 重量分别为 0、1.68、3.36 和 5.04 kg。

1.3 动水槽实验流速选择

南极磷虾拖网的实际拖曳速度为 1.5~2.5 kn^[3], 基于修正田内准则进行换算时, 中层拖网修正的速度比公式中, n 一般取 0.15, 且考虑到材料密度的差异, 计算得知实际速度与模型速度比值约为 1.77, 则模型网测试的速度范围为: 0.66~1.10 m/s。综合考虑实验水槽设备条件及六分力等测力系统量程, 本研究设定流速条件分别为 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 m/s。

速度比公式:

$$\frac{V_f}{V_m} = \left(\lambda^{m+1} \frac{\rho_{sf} - \rho_f}{\rho_{sm} - \rho_m} \frac{\rho_m}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (1)$$

式中, V_f 、 V_m 分别表示实物网和模型网的速度, m/s; ρ_{sf} 、 ρ_{sm} 分别表示实物网和模型网的网线材料密度, g/cm³; ρ_f 、 ρ_m 分别表示海上实验时海水的密度和模型实验时水的密度, g/cm³; λ 为小尺度比; n 为修正参数, ρ_{sf} 为聚乙烯材料 (PE), 密度 0.96 g/cm³。 ρ_{sm} 为尼龙材料 (PA),

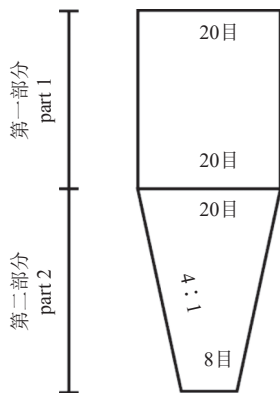


图 1 网囊网片结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for netting panel of codend

密度 1.15 g/cm³。 ρ_f 为海水密度 1.03 g/cm³, ρ_m 为水的密度 1.00 g/cm³。

1.4 动水槽实验流程

网囊实验在东京海洋大学循环动水槽中进行, 水槽主尺度为 9.0 m×2.2 m×1.6 m, 实验期间水温保持在 17.6~18.4 °C。水槽侧面为钢化玻璃制成的观察窗, 在观察窗正前方放置定点摄像机, 摄像机规格为 1 920 像素×1 080 像素, 59 帧/s, 用于观察和记录实验中网囊的形态变化情况; 实验前将网囊网口绕缝在圆形刚性框架上, 六分力仪器与刚性框架连接, 在六分力仪器正前方 1.2 m 处设置流速计检测水流速度。各测试仪器设备设置的具体情况见图 2。

首先, 将圆形刚性框架与六分力仪器连接, 使圆形刚性框架平面垂直于水流方向, 再将其浸入水中 (圆形刚性框架柄浸水 10.0 cm), 待流速达到稳定后, 测量实验设置的 5 种流速条件下圆形刚性框架的阻力。然后将网囊绕缝在圆形刚性框架上, 相同方法测量网囊和框架系统阻力, 待网囊形状基本稳定后, 拍摄 10 s 网囊形态。测量完空网囊在 5 种流速条件下的阻力和形态后, 加入 4 种模拟渔获物, 重复上述过程, 完成全部测量实验。

1.5 数据分析

网囊形态数据处理 首先, 将实验拍摄的视频应用 DaumPotPlayer 软件以 4 Hz 频率截取图片 (图 3), 然后应用 GetData Graph Digitizer 软件, 根据实验设备的设置位置以及特征长度作为标尺, 得到包括网囊末点在内的网囊节点空间坐标, 将相应参数和坐标值导出, 绘制网囊形态图。

网囊体积获取 将网囊形态处理所得数据, 利用积分圆柱法获得网囊体积, 公式:

$$x = f(x) \quad (2)$$

$$f(x) = c_1 x^4 + c_2 x^3 + c_3 x^2 + c_4 x + c_5 \quad (3)$$

$$V = \int_0^x f^2(x) \times \pi \times x dx \quad (4)$$

式中, V 为网囊体积, cm³; x 为网囊高度, cm; $f(x)$ 为网囊半径函数, c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 分别为系数。

1.6 傅里叶分析

存在渔获物时, 网囊尾端位置和水阻力变

化存在明显周期性振荡现象, 因此对结果采用傅里叶级数拟合方程, 并利用皮尔逊相关系数检验拟合方程与实验结果的相关性 (皮尔逊相关性分类: 80%~100% 为极强相关, 60%~80% 为强相关, 40%~60% 为中等程度相关, 20%~40% 为弱相关, 0%~20% 为极弱相关或无相关)。

傅里叶变换分析法和计算公式:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (5)$$

式中, t 为时间, s; a_n 、 b_n 为振幅, cm; ω_n 为角频率, rad/s; n 为级数。

2 结果

2.1 实验中刚性框架阻力

实验开始前对圆形刚性框架水阻力进行测试

量, 结果如图 4 所示。框架阻力随流速的增加呈幂次增大, 当流速达到 0.3 m/s 时, 圆形刚性框架水阻力约为 32.5 g, 当流速为 1.1 m/s 时, 圆形刚性框架水阻力约为 541.4 g。通过非线性拟合得出流速与刚性框架水阻力之间的关系式:

$$R = 422.470 \times V^{2.707} (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

式中, R 为刚性框架阻力, g; V 为流速, m/s。

2.2 网囊阻力变化

图 5 为去除圆形刚性框架水阻力后, 4 种不同重量模拟渔获物的网囊阻力与各种流速之间的关系。相同渔获条件下, 网囊水阻力随流速的增加而增加。其中, 无渔获物的 (空网) 网囊水阻力最小, 5.04 kg 模拟渔获物的网囊水阻力最大。 $V \leq 0.6$ m/s 时, 模拟渔获物每增加 1 倍 (1.68 kg), 其网囊水阻力增加值约为空网的

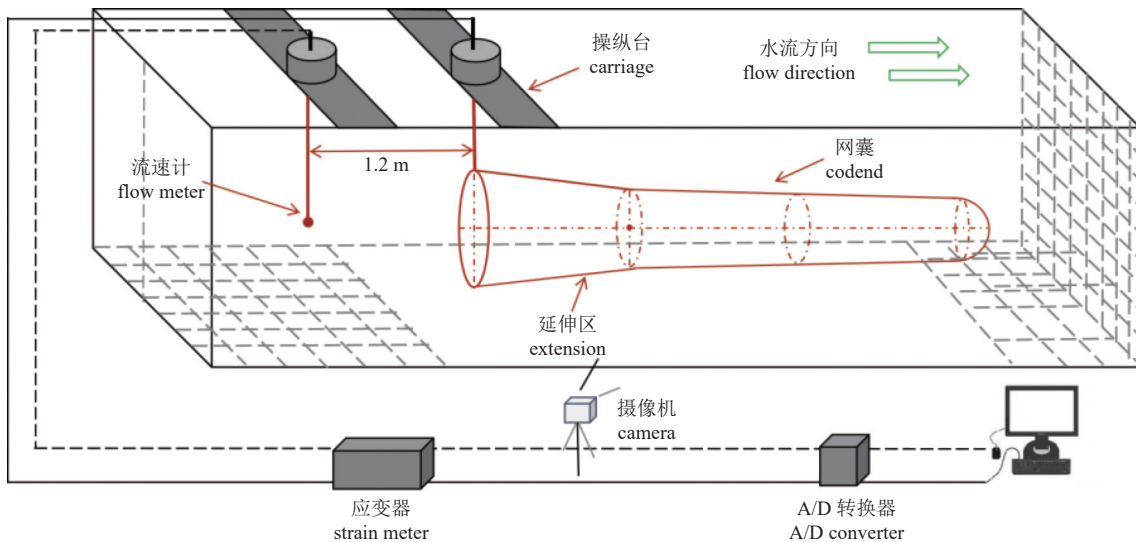


图 2 动水槽和仪器设备

Fig. 2 Flume tank and equipment

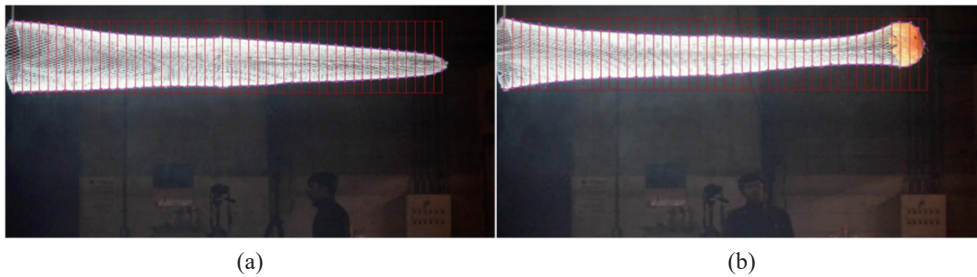


图 3 网囊的拍摄镜头

(a) 空网囊, (b) 存在模拟渔获物。

Fig. 3 The camera footages of codend

(a) empty codend, (b) codend with catch.

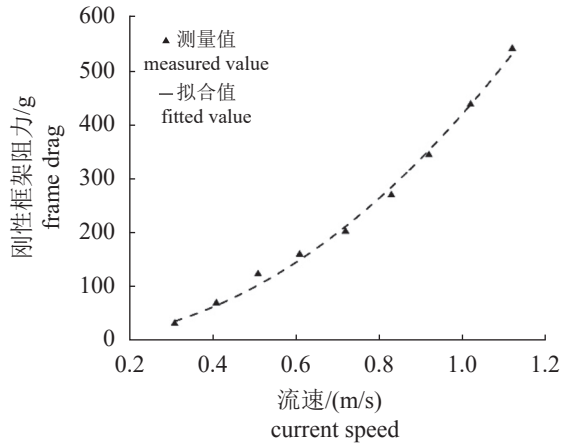


图 4 框架阻力与流速的关系

Fig. 4 Relationship between frame drag and current speed

30%。当 $V > 0.6$ m/s 时, 网囊水阻力增加幅度随着模拟渔获物重量的增加而减小。

2.3 网囊形态变化

根据网囊节点位置坐标绘制的不同模拟

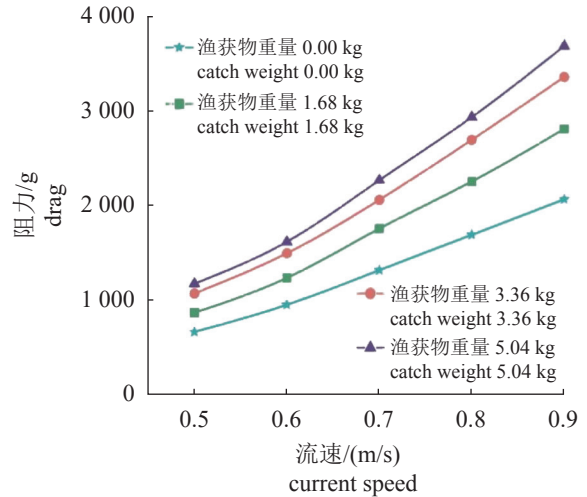


图 5 不同模拟渔获物重量与网囊水阻力的关系

Fig. 5 Relationship between drag of the codend with different simulated catch weight

渔获物重量的网囊在各流速条件下的形态侧视图见图 6。空网时, 随着流速增大, 网囊由

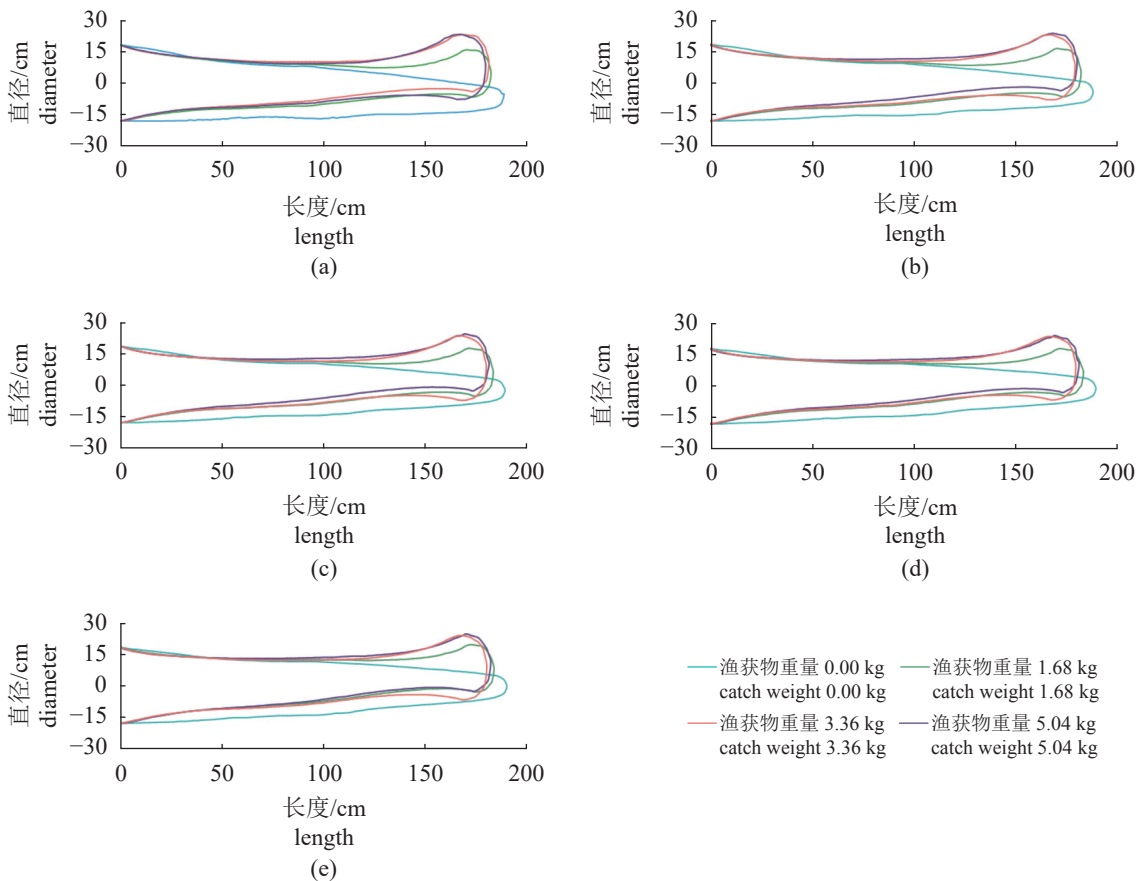


图 6 网囊形态在不同模拟渔获物重量和流速条件下的侧视图

Fig. 6 Side view of shape transformation for codend with different simulated catch weight at different current speeds

(a) 0.5 m/s, (b) 0.6 m/s, (c) 0.7 m/s, (d) 0.8 m/s, (e) 0.9 m/s, the same below.

下垂状态逐渐上浮, 且网囊下部网衣逐渐展开。流速 ≥ 0.7 m/s 时, 网囊中轴线基本水平, 网囊锥度随流速增大而减小。当网囊内存在渔获物时, 网囊末端隆起, 随着流速增大, 中

间部位束缚程度增大, 而随着模拟渔获物增多, 出现不同程度的上浮。图 7 为模拟渔获物在各流速条件下网囊水平长度图, 同一速度条件下, 模拟渔获物重量越大, 网囊水平长度越短。

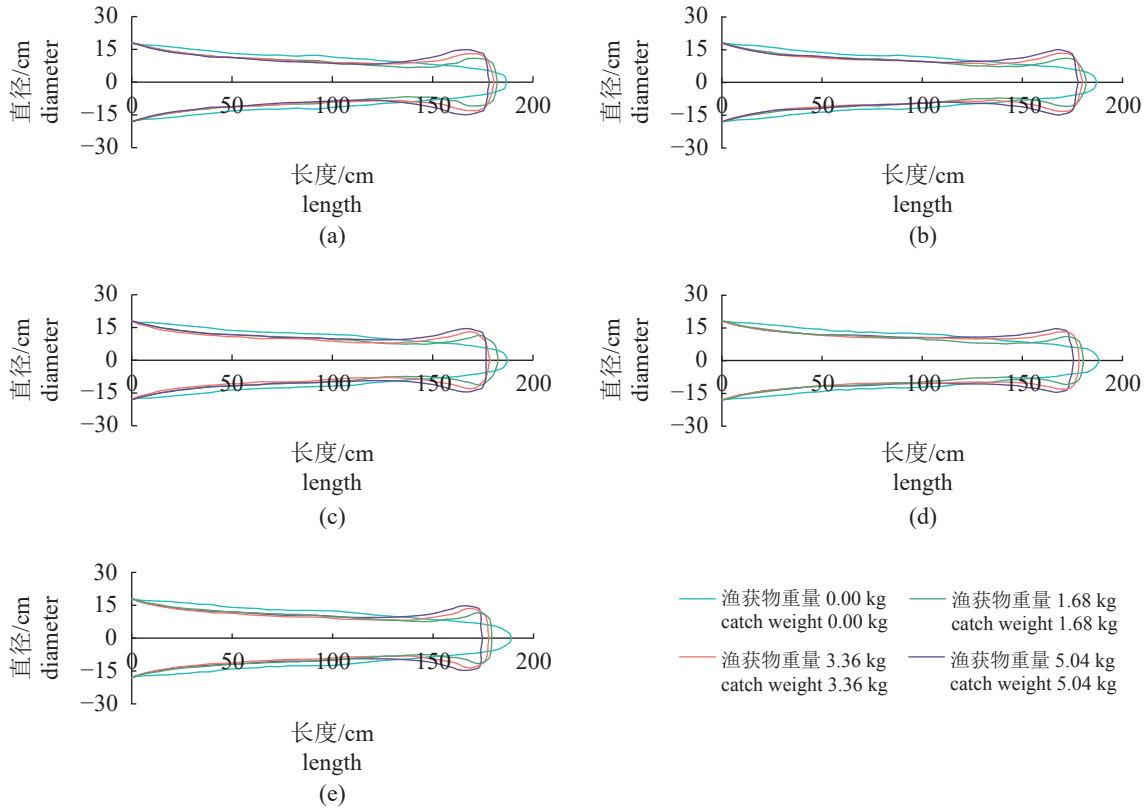


图 7 各模拟渔获物重量和流速条件下网囊水平长度

Fig. 7 Horizontal length for codend with different simulated catch weight at different current speeds

2.4 网囊体积变化

图 8 为不同模拟渔获物量在各流速条件下网囊体积变化。可发现网囊体积与渔获物重量的大小成正比, 但无渔获物时, 网囊体积最大。渔获物为 1.68 kg 时, 网囊总体积最小, 约为空网总体积的 0.74 倍。渔获物重量增加至 3.36 kg 时, 随着速度的增加, 网囊体积变化相对稳定。渔获物为 5.04 kg 时, 网囊体积随流速的增加而增加, 平均约为空网总体积的 0.8 倍。

2.5 网囊阻力随时间序列的变化

当网囊存在渔获物时, 网囊结构水阻力随着渔获物的增加而增大, 随流速的增加而增大, 模拟渔获物 5.04 kg 时的网囊水阻力最大 (图 9)。本研究结果表明, 网囊水阻力值在时间序列上会发生振荡变化, 各网囊振荡周期和振幅均随流速增加而减小。相同流速条件下, 随模拟渔

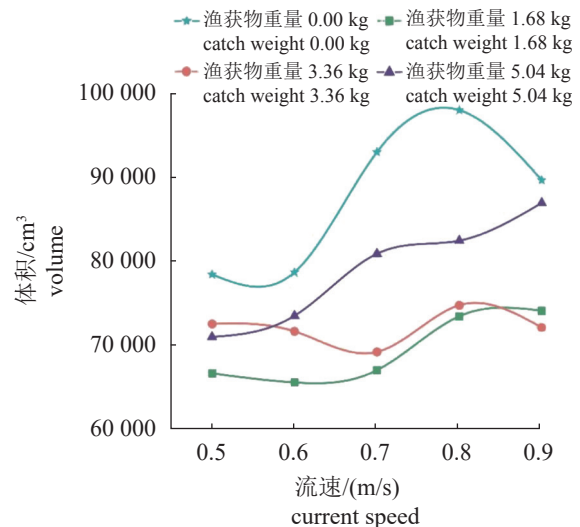


图 8 不同模拟渔获物重量的网囊体积

Fig. 8 The volume of the codend with different simulated catch weight

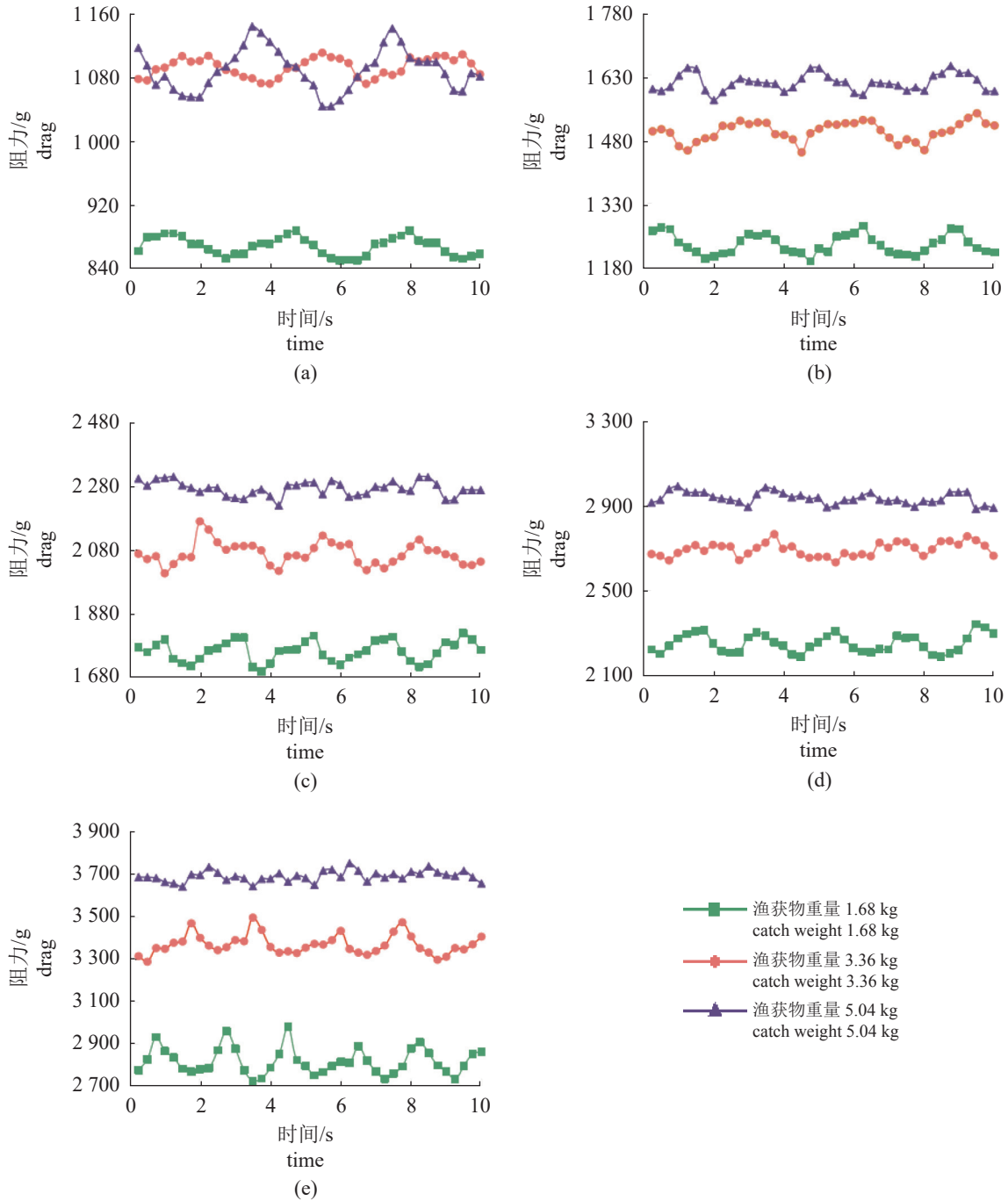


图 9 不同模拟渔获物重量的网囊阻力振荡

Fig. 9 The drag oscillation of the codends with different simulated catch weight

获物重量的增加, 各网囊振荡周期基本相同。

2.6 网囊纵向振荡距离随时间序列的变化

图 10 为各流速条件下, 不同量模拟渔获物网囊纵向振荡距离随时间变化情况。当网囊存在渔获物时, 其位置会发生振荡。随着流速增加, 各网囊振荡周期变短, 振幅减小。同一流速条件下, 不同模拟渔获物重量对网囊位置

振荡的影响主要表现为: 网囊纵向振荡距离随模拟渔获物重量增加逐渐趋于平稳, 其中, 模拟渔获物重量 3.36 kg 的网囊振荡最为剧烈, 模拟渔获物重量 1.68 kg 的网囊振荡表现平缓。

2.7 傅里叶级数拟合网囊阻力

对不同渔获物重量的网囊在各流速条件下水阻力的变化进行傅里叶级数拟合 (图 11), 并采

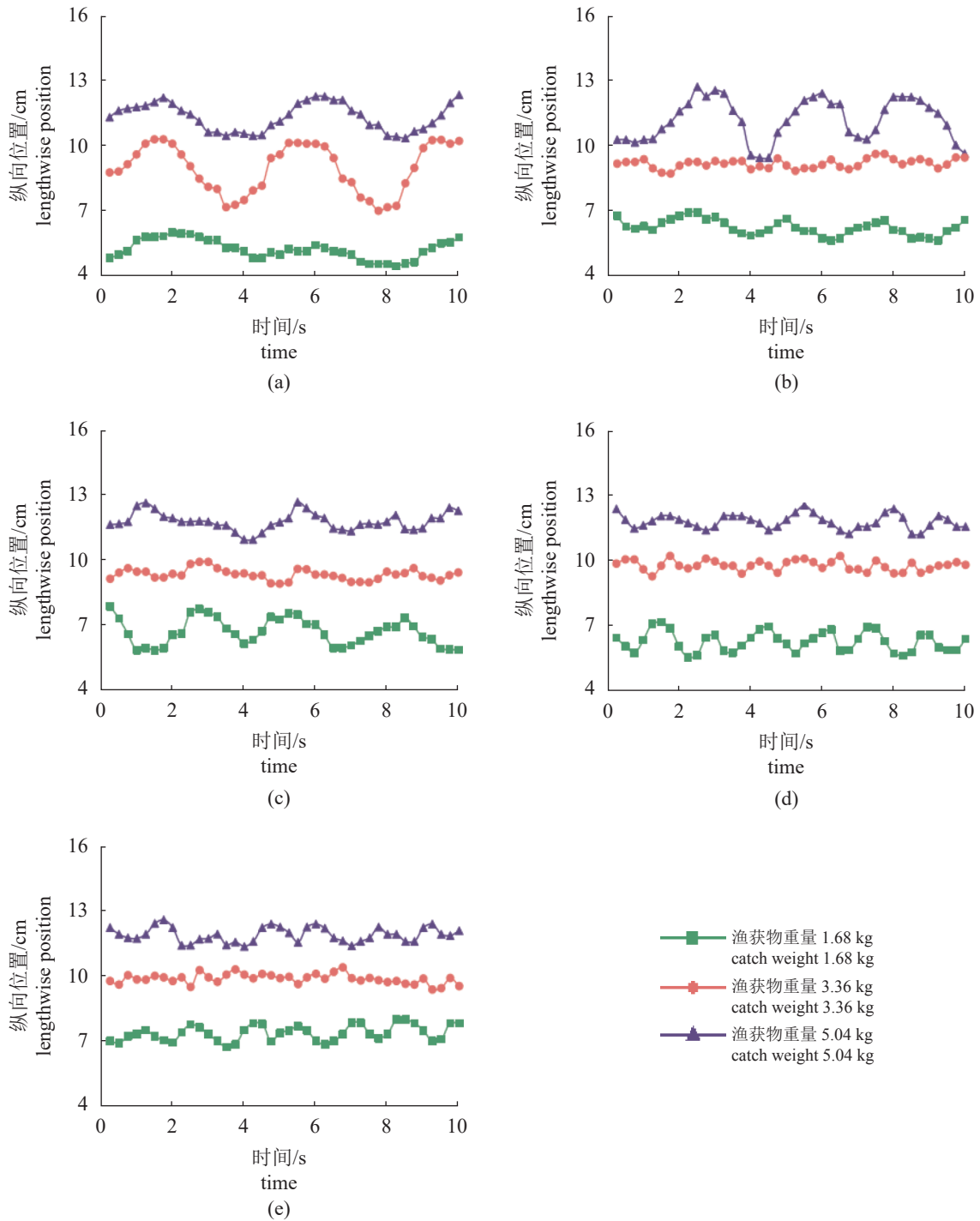


图 10 不同模拟渔获物重量的网囊纵向振荡

Fig. 10 The position oscillation of the codend with different simulated catch weight

用皮尔逊相关系数对拟合的傅里叶级数公式进行相关性检验 (图 12)。结果显示, 采用 2 级傅里叶级数拟合网囊水阻力变化规律, 拟合结果与实测数据的皮尔逊相关系数表现为极强相关性的占 53.3%, 表现为强相关性的占 46.7%; 而采用 3 级傅里叶级数拟合网囊水阻力

变化, 拟合结果与实测数据的皮尔逊相关系数有 93.3% 具有极强相关性。

2.8 傅里叶级数拟合网囊纵向位移

不同渔获物重量的网囊结构末端在纵向位置存在明显上下移动情况, 对位移波动进行傅

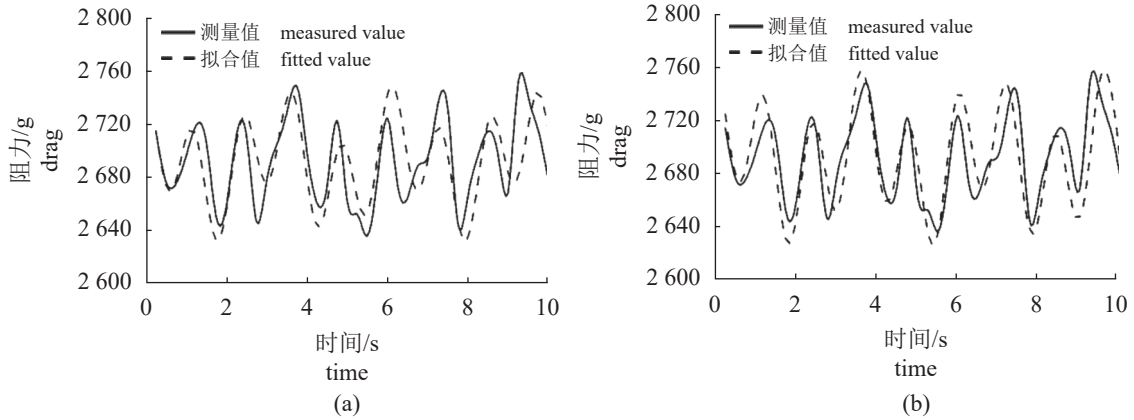


图 11 网囊阻力二级傅里叶拟合 (a) 和三级傅里叶拟合 (b)

(a) 渔获物重量 3.36 kg, $V=0.8$ m/s, 皮尔逊系数 $r=64.2\%$, (b) 渔获物重量 3.36 kg, $V=0.8$ m/s, 皮尔逊相关系数 $r=80.1\%$ 。

Fig. 11 The codend drag fitted value of the second-level Fourier series (a) and the third-level Fourier series (b)

(a) catch weight 3.36 kg, $V=0.8$ m/s, Pearson's r is 64.2%; (b) catch weight 3.36 kg, $V=0.8$ m/s, Pearson correlation coefficient is 80.1%.

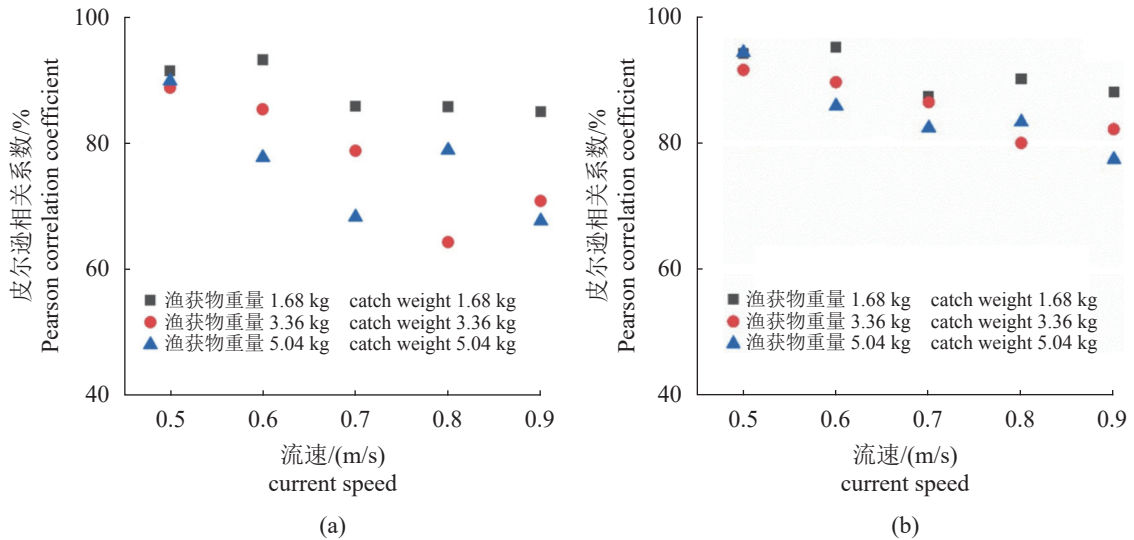


图 12 使用皮尔逊相关系数检验网囊阻力拟合值与测量值的相关性

(a) 二级傅里叶级数, (b) 三级傅里叶级数, 图 14 同。

Fig. 12 Using Pearson product-moment correlation coefficient to test the correlation between fitted value and measured value of the codend drag

(a) the second-level, (b) the third-level, the same as Fig.14.

里叶级数拟合 (图 13), 并利用皮尔逊相关系数检验拟合效果 (图 14)。结果显示采用 2 级傅里叶级数拟合网囊位置振荡, 拟合结果与实测数据的皮尔逊相关系数表现为极强相关性的为 53.3%, 强相关性的为 40%, 其余 6.7% 为中等程度相关。采用 3 级傅里叶级数拟合网囊纵向位置振荡, 拟合结果与实测数据具极强相关性的比例上升至 86.7%, 其余 13.3% 为强相关性。

3 讨论

3.1 刚性框架对网囊水阻力的影响

由于实验框架和设置的限制, 渔具基础构件的水动力测试精确性一直难以保障。为了降低实验框架对测试系统的影响, 许多研究者针对特定的渔具构件, 特别是网片水动力测试, 开发设计了多种类型的实验框架, 并验证其试验结果的精确性。由于网囊或网片等基础构件

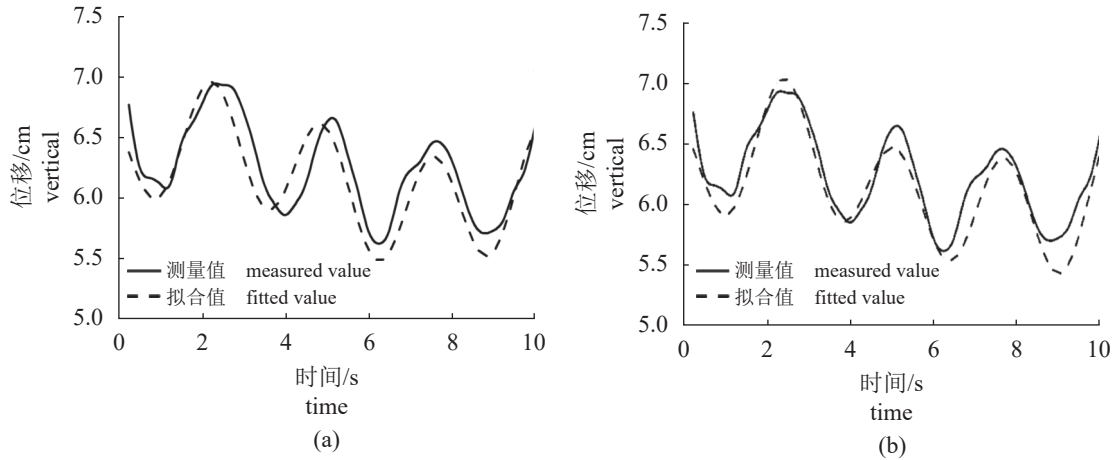


图 13 网囊位移二级傅里叶拟合 (a) 和三级傅里叶拟合 (b)

(a) 渔获物重量 1.68 kg, $V=0.8$ m/s, 皮尔逊系数 $r=83.9\%$, (b) 渔获物重量 1.68 kg, $V=0.8$ m/s, 皮尔逊相关系数 $r=95.9\%$ 。

Fig. 13 The codend displacement fitted value of the second -level Fourier series (a) and the third-level Fourier series fitted value (b)

(a) catch weight 1.68 kg, $V=0.8$ m/s, Pearson's r is 83.9%, (b) catch weight 1.68 kg, $V=0.8$ m/s, Pearson correlation coefficient is 95.9%.

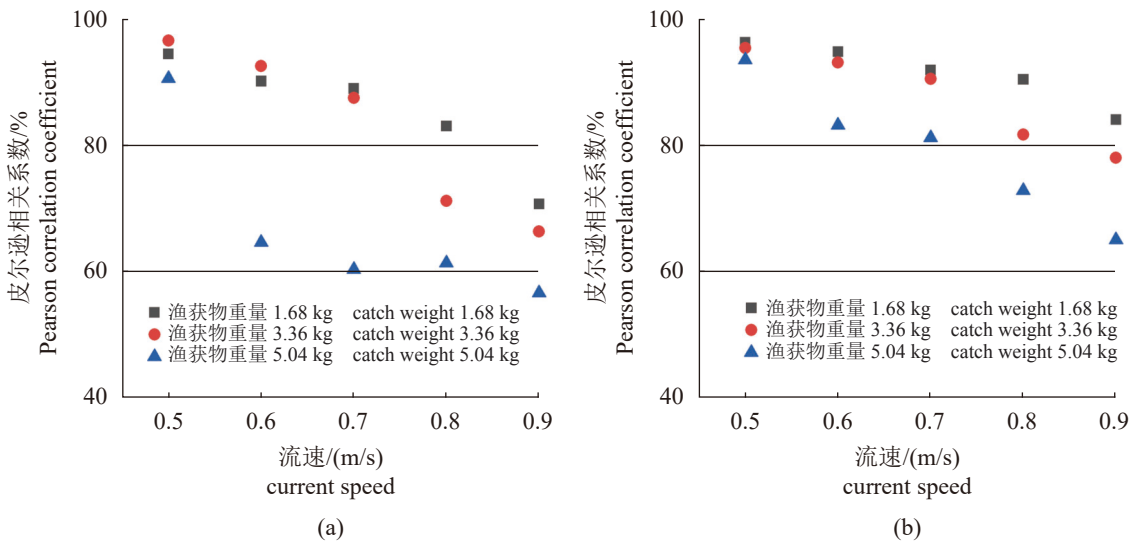


图 14 皮尔逊相关系数检验网囊位移拟合值与测量值的相关性

Fig. 14 Pearson product-moment correlation coefficient to test the correlation between fitted value and measured value of the codend displacement

的水阻力值较小, 若框架占比较大, 对基础构件的参数变化引起的系统测试结果影响较大, 无法真实反映参数变化对网片或网囊水动力性能的影响。因此, 本研究中网囊水动力实验要求实验装置阻力占比越小越好。Tang 等^[21]对网片水动力开展了大量实验测试, 提出了实验框架对测试系统结果的影响, 其中框架阻力占比为 20% 是验证框架有效性的参考指标。本研究平均刚性框架阻力占存在渔获物网囊总阻力的 $16.1\% \pm 0.7\%$, 占空网囊框架总阻力的 $17.6\% \pm$

1.3%, 且通过实验观察发现, 框架稳定性较高, 不易产生振荡, 能够满足实验基本要求。

3.2 模拟渔获物类型对实验结果的影响

由于真实渔获物在模型验中不易控制, 且容易对精密的水槽仪器和水质产生较大影响。因此, 部分学者使用模拟渔获物进行模型实验, 而模拟渔获物一般可分为两大类: 单个大体积物体和多个小体积物体。Liu 等^[18]在探究剪裁斜率对中层拖网网囊水动力及形态时, 采用注

水气球代替渔获物。但这种模拟渔获物较大地阻碍了水流直接穿过网囊网目, 造成网囊前后较大压力差。因此, 采用单个大体积物体代替真实渔获物时, 会造成模型网囊整体阻力大于实际阻力, 且网囊振荡效果波动较大。Madsen 等^[6]在探究不同网目类型对网囊水动力及振荡的研究中, 采用小体积注水塑料袋代替渔获物, 模型网囊中的注水塑料袋在水中的行为与真实网囊的水下观察结果没有较大区别。本实验采用注水乒乓球, 同样也能阻碍水流直接穿过网目, 但因球之间的间隙较大, 进而造成整体阻力偏小。本研究采用注水乒乓球作为模拟渔获物, 主要原因是在实验中能够更好地控制渔获物重量规格, 利于探究不同渔获物重量对网囊振荡变化的影响规律。

3.3 模拟渔获重量对网囊性能的影响

O'Neill 等^[20]通过理论分析发现, 网囊会因渔获物的堆积, 使其前部网目闭合, 尾部形态隆起, 导致其水阻力变大。本研究发现网囊水阻力与模拟渔获物重量呈正相关关系, 即模拟渔获物量越多, 后端隆起越大, 同流速条件下网囊水阻力越大, 这与 O'Neill 等^[20]的研究结果一致。根据各网囊形态侧视图 (图 5) 发现, 空网网囊在低流速条件下, 下部网衣存在明显堆积现象。Liu 等^[18]研究显示, 空网条件下, 无剪裁斜率网囊在低流速下, 下部网衣存在明显堆积现象, 并且堆积的网衣会随水流呈周期性波动。本研究表明, 空网条件下, 网囊形态基本相同, 但随流速的增大, 网囊由下垂状态逐渐上浮, 且网囊下部网衣会逐渐展开, 造成此差异的原因可能是随着流速的增加, 网目趋于闭合, 滤水性不佳, 造成网片垂直压力增大。另外, 本研究还发现, 同一流速条件下, 网囊水平长度缩短, 其主要影响因素是随着模拟渔获物重量的增加, 网囊末端体积增大, 导致水平长度减小; 同时随着模拟渔获物增多, 网囊也出现不同程度的上浮, 但对网囊水平长度的影响较小。

此外, 在渔获物对网囊影响的研究中, 网囊体积的变化不容忽视。杨齐^[24]认为当各种渔获物进入网囊后, 由于水流和渔船的拖曳作用, 会逐渐地被紧压并堵塞于网囊后端, 使得网囊呈一球状, 网囊体积变化, 从而影响拖网水阻

力和滤水性能。本研究发现, 空网时网囊体积最大, 而随着模拟渔获物重量的增加, 网囊体积减小, 主要原因可能在于渔获物在网囊后端隆起, 产生形状阻力, 当水流冲击网囊底端时, 网囊底端受力最大, 从而使网囊产生纵向的拉力驱使网囊两侧收缩, 使得空网体积大于存在模拟渔获物时的网囊体积。除此之外, 空网网囊体积的变化可能受制于剪裁斜率的约束, Liu 等^[18]描绘了不同剪裁斜率网囊侧视图, 发现随着剪裁斜率的减小, 网囊侧面轮廓由矩形逐渐变为梯形至三角形, 且根据体积计算公式可推断, 网囊体积随着剪裁斜率的减小而缩小。

3.4 不同量模拟渔获物对网囊振荡特性的影响

Bouhoubeiny 等^[5]对刚性网囊的尾流效应进行了实验分析, 结果显示, 空网条件下, 涡旋的脱落会对网囊产生垂直水流的压力, 从而带动网囊产生振荡。而 Bearman^[25]研究发现, 水流经过网囊中间部分时也会产生涡旋, 但目脚所产生的涡旋脱落, 造成垂直水流的压力不足以使整顶网囊发生明显的振荡, 同时也证实了无渔获物时, 网囊位置并没有发生明显变化。本研究发现空网条件下, 网囊并不会发生明显的振荡, 这与 Bearman^[25]的研究结果一致。

存在模拟渔获物的网囊, 无论纵向位移还是阻力都存在明显波动现象。本研究为侧面拍摄, 空间位置变化结果仅显示了网囊尾部纵向位移。本研究发现, 随着渔获物重量和流速增加, 各网囊振荡周期变短, 振幅减小, 原因可能与涡旋的脱落有关。由于涡旋脱落呈周期性, 流速越快, 涡旋脱落速度越快, 网囊水动力振荡周期越短。此外, 由于受到渔获物本身重量增加的影响, 使得涡旋脱落产生的压力与渔获物重力抵消, 造成网囊振幅变小。

参考文献 (References):

- [1] 王永进, 张禹, 徐国栋, 等. 我国大网目拖网渔具研究进展与应用现状 [J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 160-166.
Wang Y J, Zhang Y, Xu G D, et al. Progress and application status on trawls with large-size mesh in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(1): 160-166 (in Chinese).
- [2] 季星辉, 林金群. 对印度尼西亚海域中国渔船使用拖网渔具的分析和探讨 [J]. 海洋渔业, 2004, 26(1): 57-60.

- Ji X H, Lin J Q. Analysis and discussion on trawl net used by fishing vessels of China in Indonesian waters[J]. *Marine Fisheries*, 2004, 26(1): 57-60 (in Chinese).
- [3] 陈明鑫. 基于海上实测和模型试验的南极磷虾中层拖网形态分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- Chen M X. Analysis of shape characteristics of Antarctic krill mid-water trawl based on sea trials and model tests[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese).
- [4] Wileman D A, Ferro R S T, Fonteyne R, *et al.* Manual of methods of measuring the selectivity of towed fishing gear[R]. Copenhagen: ICES, 1996: 1-126.
- [5] Bouhoubeiny E, Germain G, Druault P. Time-resolved PIV investigations of the flow field around cod-end net structures[J]. *Fisheries Research*, 2011, 108(2-3): 344-355.
- [6] Madsen N, Hansen K, Madsen N A H. Behavior of different trawl codend concepts[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 571-577.
- [7] Kim Y H. Analysis of the turbulent flow and tilt in the codend of a bottom trawl during fishing operations[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 64: 100-108.
- [8] 陆奇巍. 6000 kW 竹筴鱼中层拖网渔具的优化设计 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- Lu Q W. Optimization design of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) mid-water trawl used by 6000kW Chinese fishing fleet[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [9] 臧迎亮, 虞聪达. 过滤性网渔具网囊网目扩张性能研究 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2012, 31(4): 350-356.
- Zang Y L, Yu C D. Study on the expansion performance of meshes of cod-end of filterable fishing gears[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2012, 31(4): 350-356 (in Chinese).
- [10] Blevins R D, Saunders H. Flow induced vibration[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1979, 101(1): 6.
- [11] 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.
- [12] Jones E G, Summerbell K, O'Neill F. The influence of towing speed and fish density on the behaviour of haddock in a trawl cod-end[J]. *Fisheries Research*, 2008, 94(2): 166-174.
- [13] Pichot G, Germain G, Priour D. On the experimental study of the flow around a fishing net[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2009, 28(1): 103-116.
- [14] Druault P, Germain G, Facq J V. PIV measurements combined with the motion tracking technique to analyze flow around a moving porous structure[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 56: 190-204.
- [15] O'Neill F G, O'Donoghue T. The fluid dynamic loading on catch and the geometry of trawl cod-ends[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1997, 453(1963): 1631-1648.
- [16] Wan R, Jia M X, Guan Q L, *et al.* Hydrodynamic performance of a newly-designed Antarctic krill trawl using numerical simulation and physical modeling methods[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 179: 173-179.
- [17] Thierry N N B, Tang H, Xu L X, *et al.* Identifying the turbulent flow developing inside and around the bottom trawl by Electro-magnetic Current Velocity Meter approach in the flume tank[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(3): 636-656.
- [18] 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.
- [19] Priour D, de La Prada A. An experimental/numerical study of the catch weight influence on trawl behavior[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 94: 94-102.
- [20] O'Neill F G, Knudsen L H, Wileman D A, *et al.* Cod-end drag as a function of catch size and towing speed[J]. *Fisheries Research*, 2005, 72(2-3): 163-171.
- [21] Tang H, Hu F X, Xu L X, *et al.* Variations in hydrodynamic characteristics of netting panels with various twine materials, knot types, and weave patterns at small attack angles[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1923.
- [22] Hu F X, Matuda K, Tokai T. Effects of drag coefficient of netting for dynamic similarity on model testing of trawl nets[J]. *Fisheries Science*, 2001, 67(1): 84-89.
- [23] Thierry N N B, Tang H, Zhang J, *et al.* Experimental analysis of the influence of gear design and catch weight on the fluid-structure interaction of a flexible codend structure used in trawl fisheries. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2505.
- [24] 杨吝. 不同结构网囊特性的初步研究 [J]. 湛江海洋大学学报, 1998(2): 25-29.
- Yang L. Preliminary study on characteristics of different trawl cod-end designs[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1998(2): 25-29 (in Chinese).
- [25] Bearman P. Vortex shedding from oscillating bluff bodies[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1984, 16: 195-222.

Effects of the simulated catch weight on the hydrodynamic and oscillation characteristics of the codend

TANG Hao^{1,2,3,4,5}, ZHANG Feng¹, LIU Wei¹, YE Xuchang^{1,2*},
HU Fuxiang⁶, XU Liuxiong^{1,2,3,4,5}

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

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

3. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources,

Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

6. Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 108-8477, Japan

Abstract: To investigate the relationship between hydrodynamic characteristics and catch weight inside the mid-water trawl codend, this study examined the effects of catch weights (0.00, 1.68, 3.36 and 5.04 kg) on the drag force, shape, and oscillation of codend under five different flow velocities (0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 m/s) using flume tank experiment. The results show that: ① the drag force of the codend increased with increasing flow velocity and catch weight. At lower flow velocities, the drag force of the codend with a catch weight of 1.68 kg was 30% greater than that of empty codend; ② the shape of the codend structure tended to constrict with increasing flow velocity, while it expanded with increasing catch weight. However, the fish guiding area tightened and took on a "waist drum"; ③ the codend volume was directly proportional to the catch weight. When the catch weight increased to 5.04 kg, the codend volume was approximately 0.8 times that of the empty codend, indicating that the empty codend has the greatest volume. Under different catch weight, the periodicity and the amplitude of codend position oscillations decreased with increasing flow velocity. The codend position oscillations were fitted using a third-order Fourier series, yielding satisfactory results. These findings are expected to contribute to the optimization of the codend structure and provide relevant information for improving the hydrodynamic characteristics, geometric shape, and selectivity of the mid-water trawl codend.

Key words: codend; drag characteristic; oscillation characteristic; catch weight; shape

Corresponding author: YE Xuchang. E-mail: xeye@shou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32373187); Shanghai Natural Science Foundation (23ZR1427000)