

文章编号: 1674-5566(2026)01-0279-13

DOI: 10.12024/jsou.20250504865

不同内衬网比例的南极磷虾桁杆拖网模型水槽试验水动力性能分析

王晨昕¹, 唐浩^{1,2,3}, 刘伟⁴, 王忠秋⁴, 王鲁民⁴, 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. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要: 为探究南极磷虾(*Euphausia superba*)桁杆拖网内衬网的最佳装配比例, 实现绿色低碳捕捞目标, 以南极磷虾专业捕捞加工船“深蓝”号采用的南极磷虾桁杆拖网为研究对象, 基于修正的田内准则制作了大尺度比为15的桁杆拖网模型网, 并在循环动水槽中开展试验, 探究内衬网比例(100%、90%、80%)和重锤质量(0.5、1.0、1.5、2.0 kg)对桁杆拖网模型网整体形态、阻力、能耗系数、稳定性的影响。结果表明: (1)当内衬网比例减少, 模型网阻力和能耗系数呈下降趋势, 网口高度无明显变化; 在相同条件下, 当内衬网比例减少20%时, 模型网阻力减少12.02%, 能耗系数降低5.66%。(2)当流速增加, 模型网网口高度降低, 网具整体收缩, 阻力增大。(3)重锤质量的增加与模型网阻力、网口高度和能耗系数呈正相关关系。(4)减少内衬网比例, 增加重锤质量, 模型网阻力振荡趋于稳定, 振幅减小。适当减少内衬网比例并增加重锤质量, 有助于降低拖网阻力和能耗。本研究结果可为南极磷虾桁杆拖网网具优化设计提供基础科学参考。

关键词: 南极磷虾桁杆拖网; 内衬网比例; 重锤质量; 水槽模型试验; 水动力性能

中图分类号: S 972.13 文献标志码: A

南极磷虾(*Euphausia superba*)作为南极生态系统的关键物种, 其庞大的生物量和丰富的营养价值使其成为全球渔业资源开发的重点目标^[1-2]。然而, 南极磷虾体型较小, 通常体长仅为35~60 mm, 具有集群特性, 主要活动集中在0~200 m水深^[3]。目前, 南极磷虾的捕捞方式主要有2种: 传统中层拖网捕捞和连续泵吸系统捕捞^[4]。近年来, 连续泵吸桁杆拖网因其显著提升的捕捞效率和渔获品质, 逐渐受到国际渔业界的重视。该技术通过集成泵吸系统实现渔获物的连续输送, 有效减少了传统单船网板拖网作业方式中的起网频率, 在提升捕捞效率的同时更好地保持了南极磷虾的质量^[5-6]。

桁杆拖网作为连续泵吸式捕捞系统的关键组件, 其作业性能直接影响南极磷虾的捕捞成功率。国内外学者针对拖网作业性能开展了一定研究, 主要包括拖网的网型结构设计^[7-8]、材料选择^[9]和属具配置^[10-11]等方面。其中, 重锤作为桁

杆拖网的重要属具, 其主要功能是调节网具的垂向稳定性与网口张开程度。陈明鑫^[12]基于海上实测和模型试验对传统南极磷虾中层拖网水动力性能进行分析, 发现随着重锤质量的增加, 网口垂直扩张效果显著增强, 而网具阻力的增幅较小, 可降低能耗系数, 提升捕捞效率。冯超^[5]开展了南极磷虾桁杆拖网结构优化分析, 发现增加重锤质量可在一定程度上降低能耗系数。然而, 重锤质量对整体水动力性能的改善作用相对有限, 过重的重锤配置可能增加操控难度, 影响作业灵活性。更为重要的是, 拖网装配小网目的内衬网, 可以防止南极磷虾逃逸, 是有别于其他类型拖网的特征之一。王忠秋等^[13]通过海上实测, 开展了南极磷虾拖网内衬网选择性研究, 结果表明, 装配内衬网的网段几乎无磷虾逃逸发生。GRIMALDO等^[14]研究表明, 装配内衬网的拖网捕捞效率高于未装配内衬网的拖网, 但内衬网的装配会显著增加拖网的总阻力^[15]。TANG等^[16]

收稿日期: 2025-05-08 修回日期: 2025-09-05

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

作者简介: 王晨昕(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔具渔法。E-mail: 1578345735@qq.com

通信作者: 唐浩, E-mail: htang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

利用动水槽模型试验分析了不同内衬网比例对传统中层拖网水动力性能的影响,发现减小内衬网比例可有效降低拖网的总阻力,改善网口的扩张性能,同时提出75%内衬网装配比例拖网性能表现最佳。

因此,内衬网装配比例是网具结构优化的重要核心参数。但针对南极磷虾桁杆拖网内衬网装配比例缺乏量化和统一标准^[10,17]。内衬网比例的变化对拖网水动力性能,特别是对拖网阻力振荡特性的影响规律尚不清晰。为此,本研究以我国南极磷虾专业捕捞船“深蓝”号使用的连续泵吸式桁杆拖网为原型网,采用修正田内准则制作大尺度比为15的模型网,利用循环动水槽测定不同内衬网比例和重锤质量下,南极磷虾桁杆拖网的阻力、形态和振荡等水动力特性变化,以期为南极磷虾桁杆拖网网具优化设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 模型网制作

原型网为中国南极磷虾专业捕捞船“深蓝”号,船总长约120 m,宽21.6 m,主机功率为4 000 kW×2,作业使用的桁杆拖网如图1所示。桁杆拖网全网总长度为152 m,网口高度20 m。

桁杆长度为18 m,直径0.5 m,壁厚25 mm,总质量8 t。外网材料为聚乙烯(Polyethylene, PE),前6段网目尺寸为200 mm,网线材料粗度为6 mm,后4段网目尺寸为144 mm。网线材料粗度为4 mm。内网材料为聚酰胺(Polyamide, PA),内网网目尺寸为16 mm,网线粗度为1 mm。曳纲长度根据拖网深度进行调整,主要分布范围为50~200 m。每顶网配备2个重锤,每个重锤质量为2 t。

采用修正的田内准则^[18]制作模型网(修正系数为n=0.15),根据原型网主尺度以及循环动水槽主尺度,同时方便实验操作,确定模型网的大尺度比为15。并根据网线材料特性和网目尺寸的相似性要求确定小尺度比为5。考虑到原型网外网使用的材料PE硬度高,柔韧性低,因此模型网主要采用PA材料制作,网具共有10段,根据修正田内准则,前6段网目尺寸为40 mm,网线材料粗度为1.2 mm,后4段网目尺寸为30 mm。网线材料粗度为0.8 mm。内衬网采用PA材料,网目尺寸为10 mm,网线材料粗度为0.2 mm。内衬网从网身第二段装配至网囊末端,各段内衬网一般采用横向绕缝的方式与模型网外网连接。模型网具在制作过程中严格保持与实物网具一致的缩结关系,如图2所示。

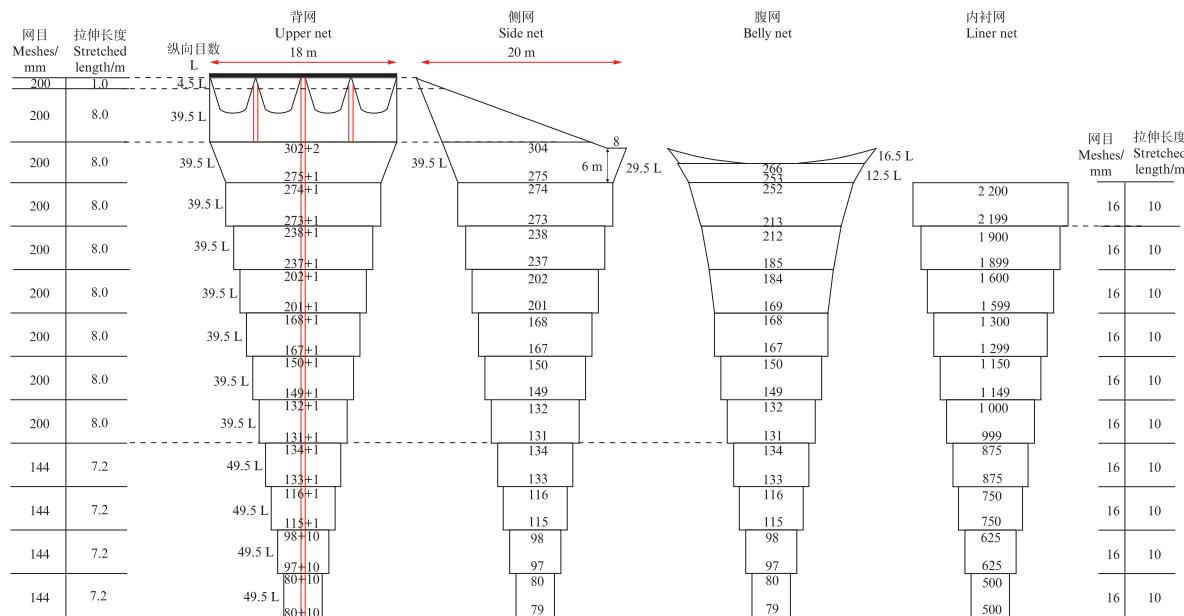


图1 “深蓝”号南极磷虾桁杆拖网原型网

Fig. 1 Prototype net of “Deep Blue” Antarctic krill beam trawl

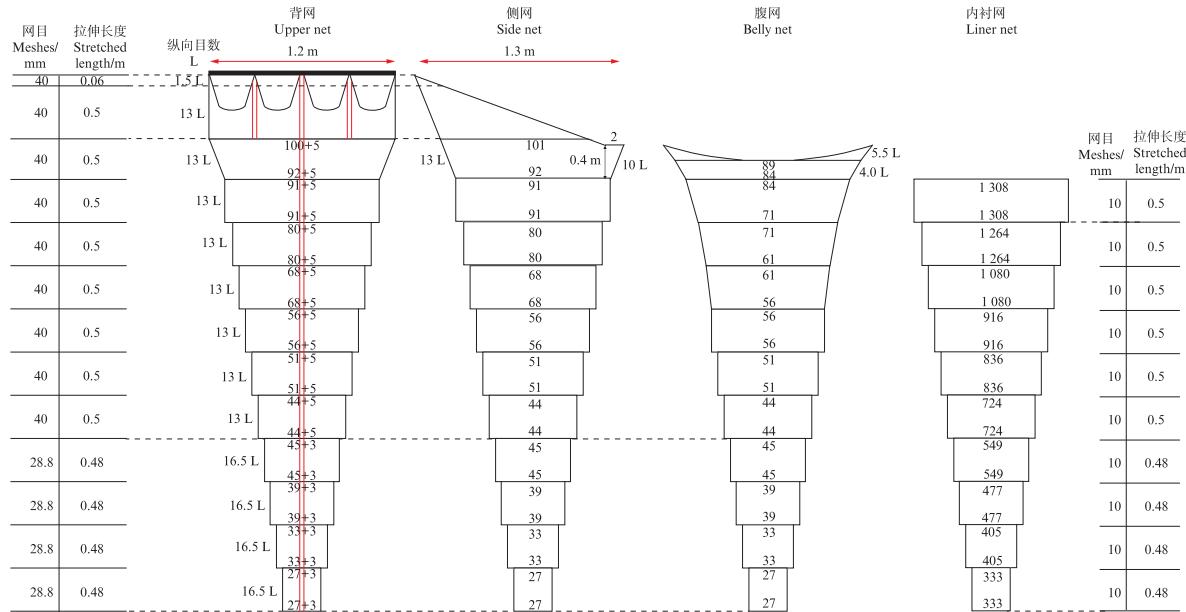


图2 南极磷虾桁杆拖网模型网

Fig. 2 Model net of Antarctic krill beam trawl

1.2 模型试验参数及流程

模型试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,水槽主尺度:9.0 m(长)×3.5 m(宽)×2.0 m(深)。测力传感器:

型号为LC-FWP-500,量程为500 N,测量误差为0.25% F.S.。使用高清摄像机拍摄网具在水中的形态,设置标尺获取模型网外网网口的高度数据。具体试验装置如图3所示。

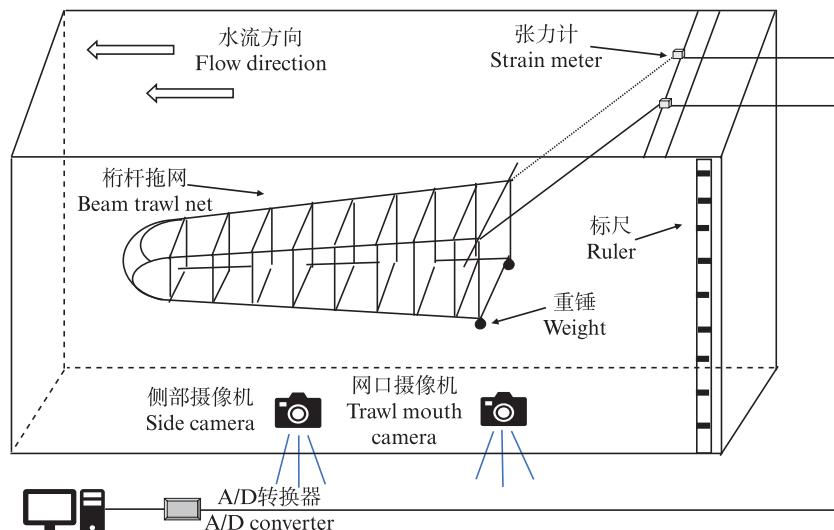


图3 试验设置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental design

1.2.1 模型试验参数设置

根据修正后的田内准则,模型网和实物网的换算过程如下。

速度比计算公式:

$$\frac{V_F}{V_M} = \left(\lambda'^{n+1} \times \frac{\rho_{sF} - \rho_F}{\rho_{sM} - \rho_M} \times \frac{\rho_M}{\rho_F} \right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (1)$$

式中: λ' 为小尺度比; V_F 、 V_M 分别为实物网与模型网的拖曳速度,m/s; ρ_{sF} 、 ρ_{sM} 分别为实物网和模型网的网线材料密度,g/cm³; ρ_{sF} 为聚乙烯材料,密度为0.96 g/cm³; ρ_{sM} 为尼龙材料,密度为1.15 g/cm³; ρ_F 、 ρ_M 分别为海水密度和水槽内水的密度,g/cm³; $\rho_F=1.03$ g/cm³, $\rho_M=1$ g/cm³;根据修正的田内准则,

n 取0.15。

力比计算公式:

$$\frac{F_F}{F_M} = \lambda^2 \lambda' \quad (2)$$

式中: λ 为大尺度比; λ' 为小尺度比; F_F 、 F_M 分别为实物网与模型网的受力,N。

南极磷虾桁杆拖网实际作业拖速为2 kn左右,根据速度比,综合考虑水槽的试验条件,模型试验设定流速为0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m/s等5种水平。根据力比,重锤质量设定为0.5、1.0、1.5、2.0 kg等4种水平。本研究采用基于原型网具结构中实际内衬网的覆盖范围,即网身第2段开始装备内衬网作为模型网100%内衬网比例的参考,与TANG等^[16]研究设计一致。因此,通过依次减少内衬网装配部位,共设置3种内衬网装配比例,分别为100%(从网身第2段开始装配),90%(从网身第3段开始装配),80%(从网身第4段开始装配)开展试验研究。

1.2.2 模型试验流程

将模型网置于水槽中,根据冯超等^[19]桁杆拖网模型试验方法,采用两根纲索连接桁杆,并装配测力传感器进行模型网阻力测量,采样频率为50 Hz,连续采样时间为1 min。模型网整体形态由安装在水槽侧部的摄像机拍摄获取(图4)。此外,通过调整内衬网比例、重锤质量及水流速度,实现不同工况条件下拖网模型网形态及阻力的测定。

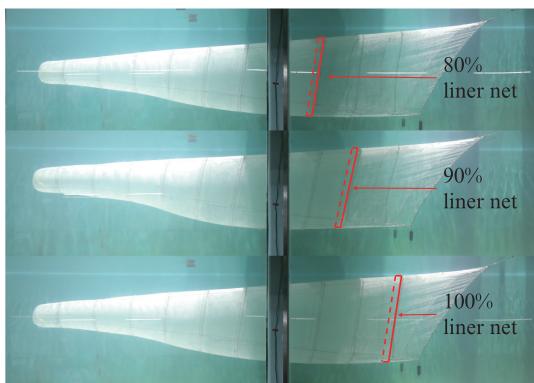


图4 南极磷虾桁杆拖网动水槽试验侧视图

Fig. 4 Side views of the beam trawl net in the flume tank

1.3 数据分析

首先通过DeFisher软件对桁杆拖网形态试验照片进行矫正,并设定统一坐标,然后,采用

GetData graph digitizer软件获取桁杆拖网模型网形态图像特征点坐标数据,绘制不同条件下桁杆拖网模型网整体形态图。模型网外网的网口高度为桁杆至下纲的水深度,其数据通过水槽外部的标尺获取,为消除水中折射产生的误差,本研究通过光学折射校准法建立水槽内外标尺高度比例系数 k ,将模型网照片中测量的网口高度换算为实际网口高度。根据MATLAB R2017b处理后的数据结果,绘制出阻力的频率和振幅变化图。

1.3.1 模型网网口高度修正

模型网网口高度修正公式:

$$k = \frac{H_w}{H_m} \quad (3)$$

式中: k 为水槽内外标尺的比例系数; H_w 为模型网外网水槽外部标尺的网口高度,cm; H_m 为模型网外网水槽内部标尺的网口高度,cm。

1.3.2 模型网阻力和能耗系数的测定与计算

模型网阻力修正公式:

$$\cos \alpha = \frac{F_c}{F_m} \quad (4)$$

式中: α 为纲索与水平方向的夹角; F_c 为张力计测量阻力,N; F_m 为模型网阻力,N。

模型网能耗系数计算公式:

$$H_F = H_m \times \lambda \quad (5)$$

$$C_e = \frac{3.472 \times F_F}{H_F \times L_F} \quad (6)$$

式中: H_F 为实物网的网口高度,m; H_m 为模型网的网口高度,cm; λ 为大尺度比; C_e 为实物网能耗系数,kW·h/(10⁴m³); F_F 为实物网的阻力,N; H_F 为实物网的网口高度,cm; L_F 为实物网桁杆长度。

1.3.3 模型网阻力振荡分析

FFT(Fast fourier transform)分析是一种常用于提取波动信号特征的数学工具,可以得到信号在时域、频域或幅值的特征^[20]。本研究中,利用FFT对拖网阻力随时间变化的波动频谱进行评估,并基于Welch方法和Hann窗口将时间序列参数的时域转换为频域。定义为

$$\widehat{\psi(f)} = \frac{1}{2\pi} \sum \psi(t) e^{-ift} \quad (7)$$

因此,得到信号在整个时间区间频域能量分布的傅里叶功率谱可以定义为

$$P_{xx}(f) = \left| \widehat{\psi(f)} \right|^2 \quad (8)$$

式中: $\psi(t)$ 是时域的泛函数; $\psi(f)$ 是傅立叶域中的泛函数; i 为虚数; f 为频率; t 为时间,可以定义为周期的倒数。 $P_{xx}(f)$ 是傅立叶频谱。

2 结果

2.1 桁杆拖网模型网整体形态

在相同内衬网比例下,随着流速的增加,模型网腹网呈收缩趋势,网位逐渐升高。流速越大,模型网腹网收缩趋势越明显,同时网位上升幅度呈现先增大后减小的变化规律。随着重锤质量的增加,模型网整体形态收缩趋势逐渐趋于

平缓。在高流速和低重锤质量条件下,模型网腹网收缩程度加剧,网位上升幅度明显增大,且模型网腹网会发生较明显变形。而在低流速和高重锤质量条件下,模型网形态稳定性最佳。在恒定流速和重锤质量下,模型网整体网位的上升幅度随着内衬网比例的减少而减小,模型网腹网没有明显的收缩趋势(图5)。流速增加会加剧模型网腹网收缩并使网位上升,而重锤质量的增加则有助于稳定模型网网具形态。内衬网比例的减少主要影响网位的上升幅度,但对模型网腹网收缩的影响程度较小。

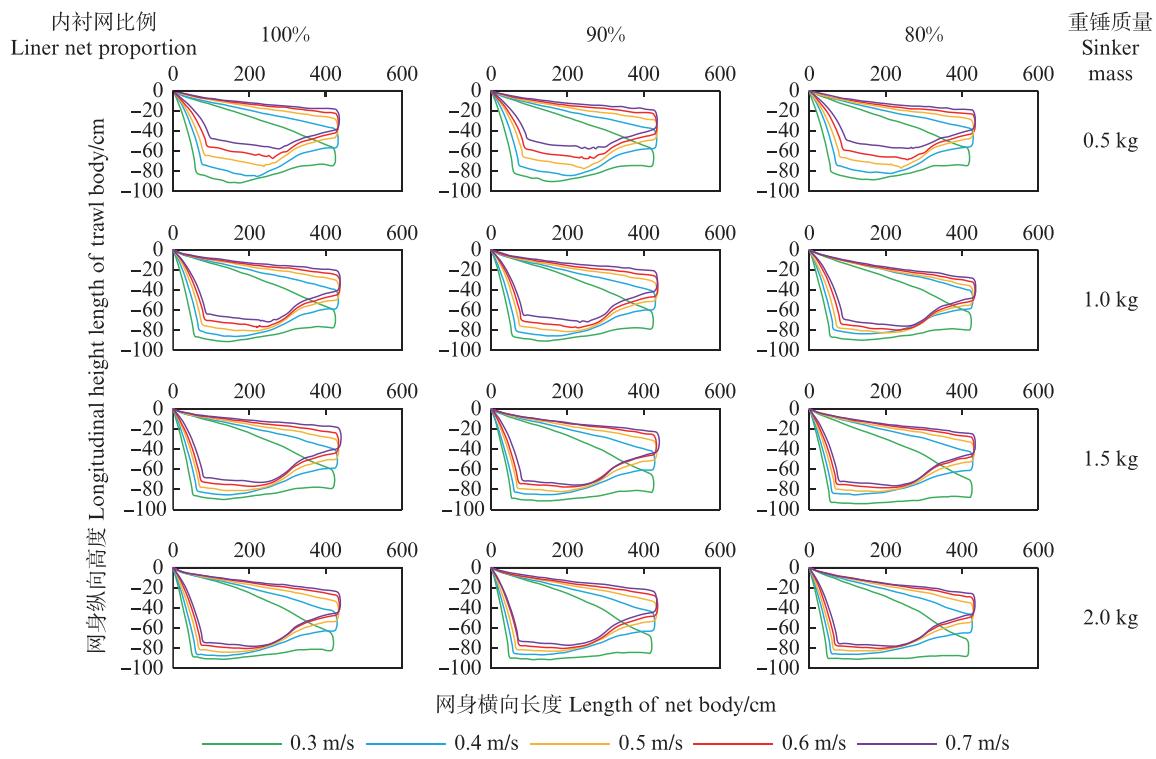


图5 不同流速下桁杆拖网的整体形态

Fig. 5 Overall shape of beam trawl under different flow velocities

2.2 桁杆拖网模型网网口高度

试验发现,重锤质量的增加能有效促进模型网网口高度的扩张,而流速的增加会抑制模型网网口高度的扩张,内衬网比例的变化对模型网网口高度无明显影响(图6)。当流速和内衬网比例保持恒定时,模型网网口高度均随重锤质量的增加而增大,但增加幅度逐渐减小。当 $v=0.7\text{ m/s}$,内衬网比例为100%时,重锤质量从0.5 kg增加至2.0 kg,重锤质量2.0 kg时的网口高度相较于重锤质量0.5 kg时增加了32.9%。当重锤质量和内衬

网比例保持不变时,模型网网口高度随流速的增大而减小,减少幅度呈现先增大后减小的趋势。当重锤质量为2.0 kg,随着流速从0.3 m/s逐步升至0.7 m/s,每一流速组的网口高度较前一流速组分别降低了4.39%、5.74%、6.09%和5.19%。流速对网口高度的影响较为明显,尤其是在较高流速条件下,网口高度的下降趋势更加明显。重锤质量的增加则促进网口的垂直扩张,但随着重锤质量的增大,其对网口高度的影响幅度逐渐减弱。

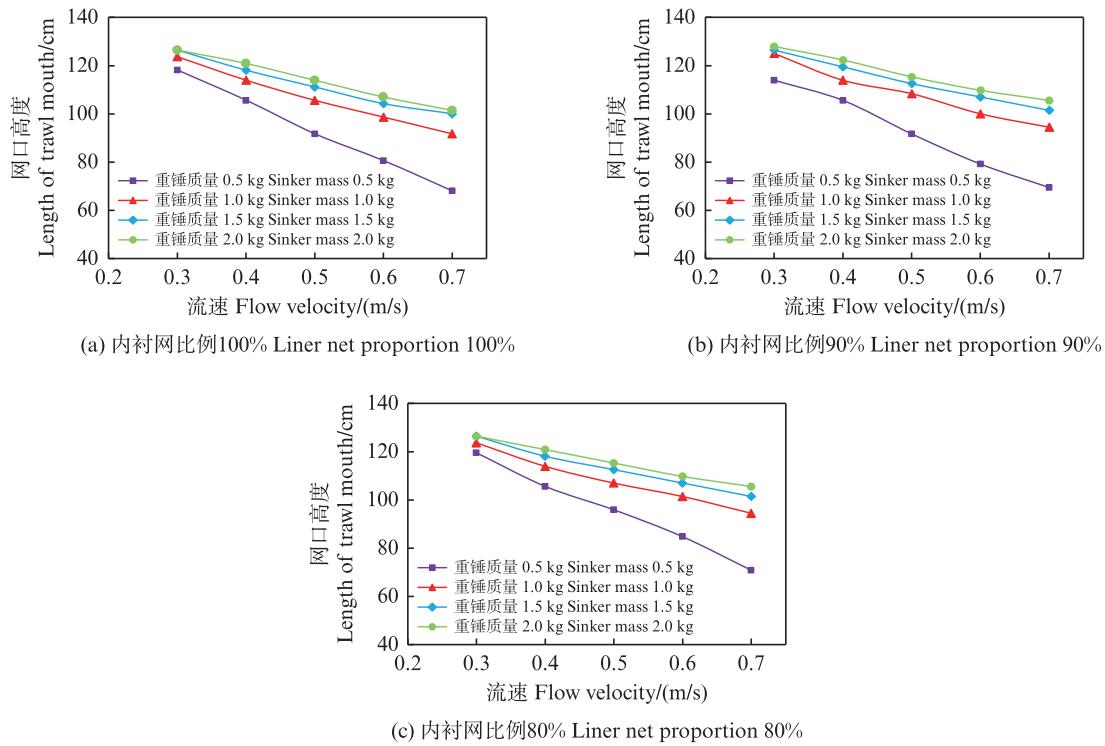


图6 不同流速和重锤质量下桁杆拖网的网口高度

Fig. 6 Mouth height of beam trawl with different flow velocities and sinker masses

2.3 桁杆拖网模型网阻力

模型网阻力与内衬网比例、重锤质量和流速均呈正相关关系(图7)。当流速保持恒定时,模型网阻力随内衬网比例的减少而减小。在重锤质量为0.5 kg, $v=0.3$ m/s条件下,内衬网比例减少20%,模型网阻力减少了12.2%。在恒定重锤质量条件下,不同内衬网比例的模型网均表现出阻力随流速上升而增大的特性,其增长率随流速升高呈现递减趋势。当内衬网比例为80%且重锤质量为2.0 kg时,流速从0.3 m/s升至0.7 m/s,模型网阻力增加了80.93%。在固定内衬网比例的情况下,随着重锤质量的增加,模型网在不同流速下均呈现阻力增大趋势,但阻力增幅逐渐减缓。当内衬网比例为100%, $v=0.7$ m/s时,重锤质量从0.5 kg逐步增加至2.0 kg,模型网阻力分别增加了20.11%(0.5 kg至1.0 kg)、8.08%(1.0 kg至1.5 kg)和3.08%(1.5 kg至2.0 kg)。总体上,流速和重锤质量的增大促进了模型网阻力的增加,而内衬网比例的降低则起到了减小模型网阻力的作用。

2.4 桁杆拖网模型网能耗系数

试验发现,内衬网比例的减少通过降低模型网阻力,有效改善了模型网的能耗性能,且在高

重锤质量条件下效果更为突出(图8)。在流速为0.7 m/s时,重锤质量为0.5 kg条件下,内衬网比例减少20%可使模型网能耗系数降低5.66%;而在重锤质量为2.0 kg条件下,相同内衬网比例减少可使模型网能耗系数降低10.27%。当内衬网比例保持不变时,模型网能耗系数随重锤质量的增大而降低。在内衬网比例为80%, $v=0.7$ m/s下,2.0 kg重锤质量的模型网能耗系数较0.5 kg降低了10.3%。当重锤质量和内衬网比例恒定时,模型网能耗系数随流速的增加而升高,但升高幅度逐渐减缓。在内衬网比例为80%,重锤质量为2.0 kg条件下,0.7 m/s时模型网能耗系数相较于0.3 m/s时上升了84.08%。内衬网比例减少和重锤质量增加均能有效降低模型网能耗系数,而流速的增大则导致模型网能耗系数上升。

2.5 桁杆拖网模型网阻力振荡

图9为试验测量的模型网阻力随时间的波动情况,结果显示,随着内衬网比例的减少,模型网阻力波动程度逐渐平缓。基于FFT分析显示,模型网阻力振荡主要以低频为主,模型网阻力振幅与流速和内衬网比例呈正相关,与重锤质量呈负相关(图10)。模型网阻力振幅主要集中在频率0.1~1.0 Hz,此频率范围内模型网阻力振荡最剧烈,且在0~

0.5 Hz 间模型网阻力振幅达到最大值。当频率超过 1.0 Hz 时,模型网阻力振荡逐渐趋于稳定。随着内衬网比例的减少,模型网阻力振幅呈现出逐渐减小的趋势。当重锤质量为 2.0 kg、 $v=0.5$ m/s 时,不同内衬网比例下模型网阻力振幅峰值存在明显差

异。100% 内衬网比例的模型网在 0.321 Hz 下的阻力振幅值达到峰值 0.13 N,而 90% 和 80% 内衬网比例的模型网阻力振幅峰值分别出现在 0.225 Hz 和 0.434 Hz,对应幅值分别为 0.07 N 和 0.06 N。

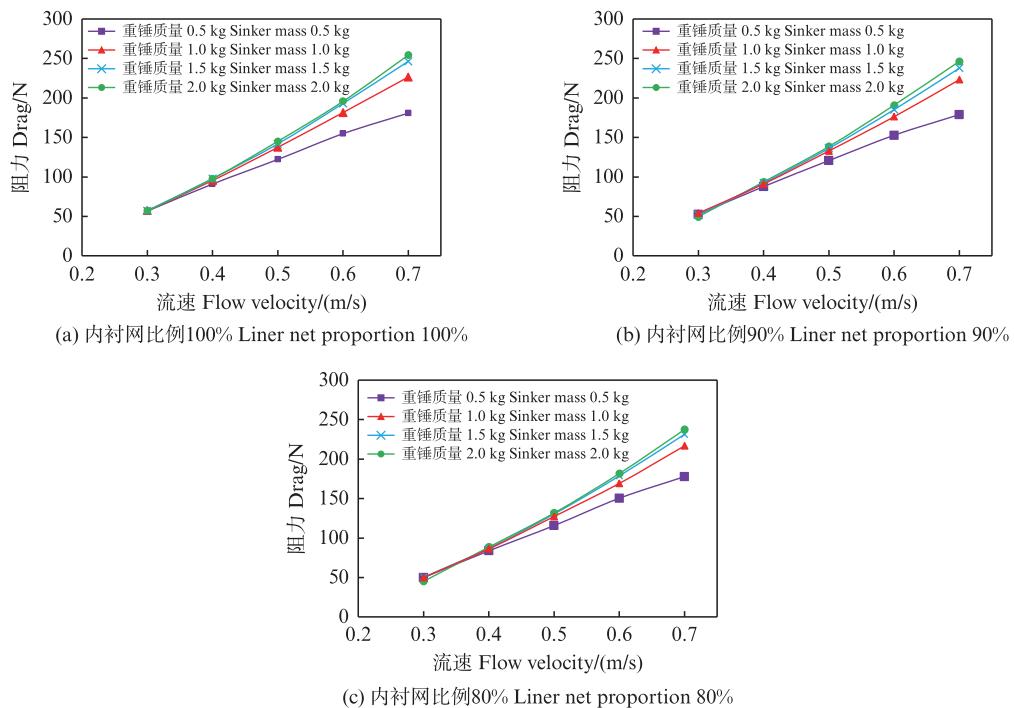


图 7 不同流速和重锤质量下桁杆拖网的阻力

Fig. 7 Drag of beam trawl with different flow velocities and sinker masses

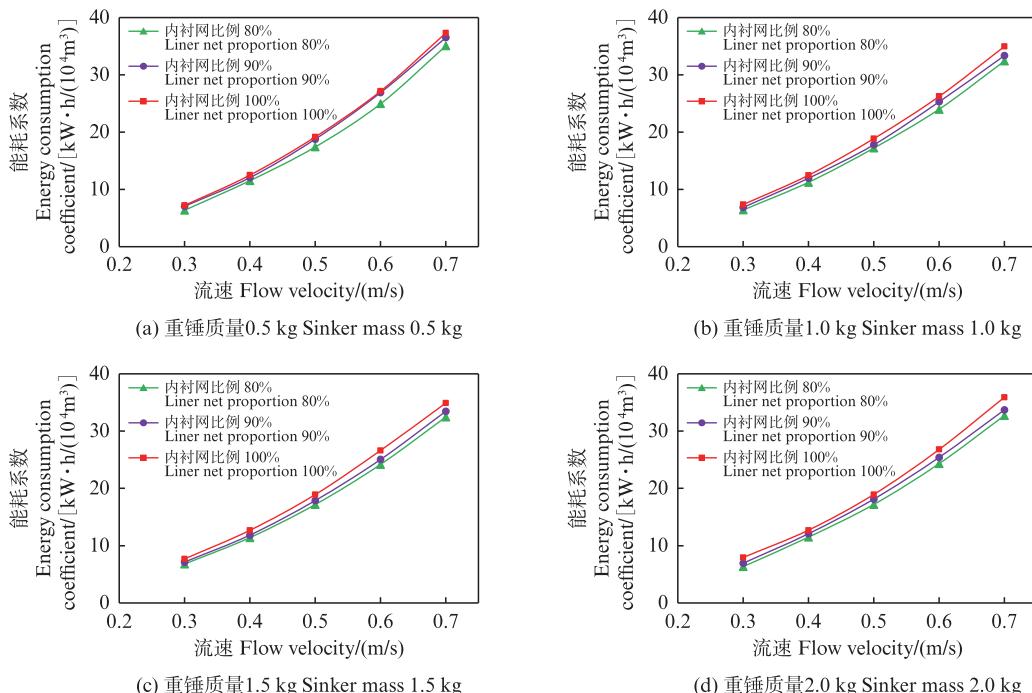


图 8 不同流速和内衬网比例的桁杆拖网能耗系数

Fig. 8 Energy consumption coefficients of beam trawl with different flow velocities and liner nets

随着流速的增加,模型网阻力振幅均值逐渐增大(图11)。在高流速条件下,内衬网比例和重锤质量对模型网阻力振荡的影响较为突出。当 $v=0.7$ m/s时,在重锤质量为0.5 kg条件下,100%内衬网比例的模型网阻力振幅均值较90%和

80%内衬网比例分别高出16.30%和20.24%。同时,在内衬网比例100%条件下,0.5 kg重锤质量的模型网阻力振幅均值比1.0 kg、1.5 kg和2.0 kg重锤质量分别高出13.03%、30.30%和31.41%。

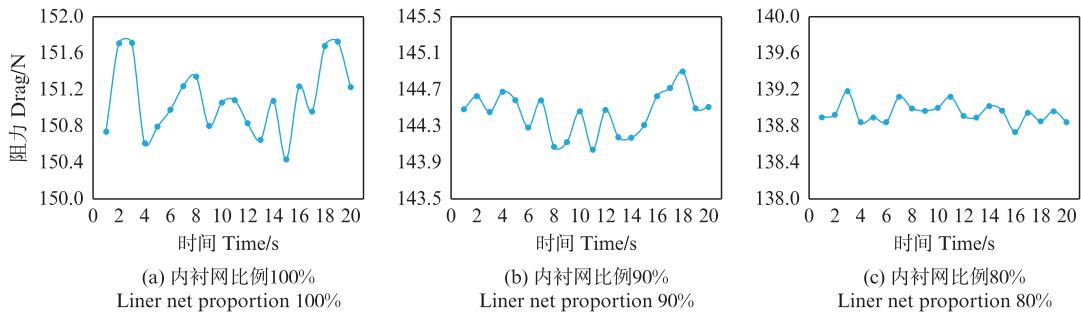


图9 阻力时间序列图
Fig. 9 Time series of model net drag

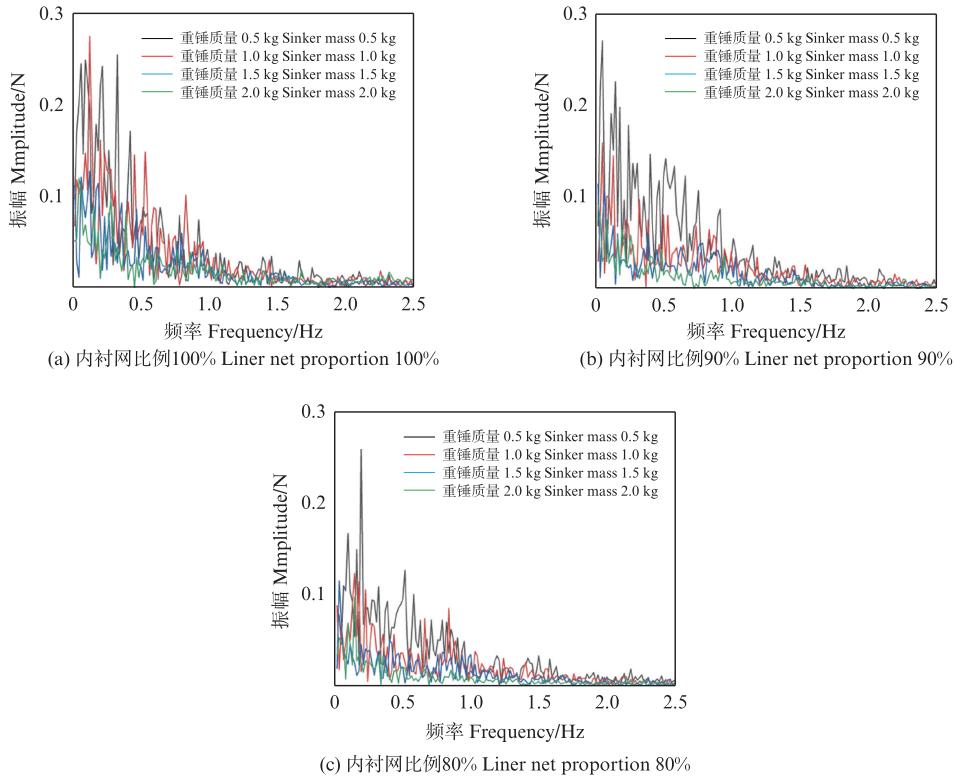


图10 不同重锤质量下桁杆拖网阻力的振幅
Fig. 10 The drag amplitude of beam trawl with different sinker masses

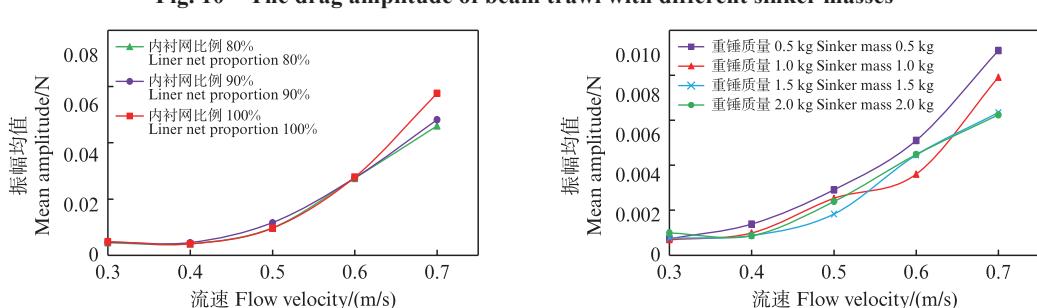


图11 不同流速下桁杆拖网的阻力振幅均值变化
Fig. 11 Variation of beam trawl drag amplitude at different flow velocities

3 讨论

拖网网身装配内衬网是防止磷虾逃逸,成功捕获南极磷虾的关键措施^[13]。然而,内衬网的装配会增加拖网的线面积,进而增大拖网阻力。本研究通过依次减少前两段网身的内衬网,分析了内衬网比例对拖网性能的影响。试验结果表明,随着内衬网比例的减小拖网总阻力呈下降趋势,与 TANG 等^[16] 和徐鹏翔等^[17] 试验结果一致。当内衬网比例较高时,拖网内部结构更为紧密,降低了水流在拖网内部的通透性,从而提高了拖网的整体阻力和能耗系数。随着内衬网比例的减少,网具的滤水性能显著提升,水流更易穿透网目结构,从而有效减弱了水流对拖网的正面冲击力及其在拖网表面形成的绕流阻力。同时,内衬网比例的减少使得拖网的刚性降低,这种柔性变化使得拖网在水中的形态更加适应水流,进一步降低了刚性结构带来的阻力。TANG 等^[16] 对不同内衬网比例下的传统南极磷虾拖网开展试验研究,结果表明,100% 内衬网的拖网阻力比无内衬网、50% 内衬网和 75% 内衬网的拖网阻力分别高出 26.66%、21.22% 和 12.20%,说明 100% 内衬网覆盖的南极磷虾拖网阻力相较于仅有外网的拖网阻力高 26.66%,即内衬网阻力(100% 内衬网覆盖符合实际网具情况)占拖网总阻力的 73.34%。本研究结果显示,在相同工况条件下,当内衬网比例减少 20%,拖网阻力下降 12.02%,这进一步证实了内衬网比例对拖网阻力的显著影响,预估实际桁杆拖网网具中内衬网阻力占比约为 70% 以上。因此,内衬网的设计与比例调整对拖网性能的优化具有重要作用。本研究还发现,重锤质量也是影响拖网阻力的重要因素。随着重锤质量的增加,网口张开程度明显增大,网衣与水流的接触面积随之扩大,导致拖网阻力呈现上升趋势。此外,重锤质量的增加直接增强了拖网的垂直张力,使网具变得更加紧绷,网目密度增大,从而进一步增加了与水流的接触面积,导致摩擦力和阻力的增大。然而,较轻的重锤质量虽然减少了拖网整体的迎流面积,降低了阻力,但因下沉力不足,导致较轻重锤质量的拖网更容易受到水流的摆动,产生附加的动态阻力,从而对捕捞效率产生不利影响。为减少拖网阻力,国内大量的试验研究以及生产实践表明,通过增大网目尺寸,可以有效减小拖网阻

力,这正是提高拖网性能的关键。基于冯春雷等^[21] 和王永进等^[7] 的研究,建议可以通过扩大外网网目尺寸,从而抵消部分内衬网装配增加的阻力。此外,改变网线材料也是减小网具阻力的重要手段,林可等^[22] 通过水槽试验对比了 PA 拖网和 PE 拖网的水动力性能,发现 PA 拖网的阻力明显低于 PE 拖网。尽管 PE 材料具有良好的耐腐蚀性和较低的摩擦系数,但其柔性较差,导致拖网在水中的展开效果不理想。因此,在本研究中,模型网及内衬网均选用了 PA 材料,可能导致拖网阻力偏小。未来研究可以考虑引用新型复合材料在拖网结构中的应用,进一步提升拖网的水动力性能。

本研究结果表明,内衬网比例的变化对网口高度的影响并不明显,与 TANG 等^[16] 的试验结果存在差异。其原因可能在于两者拖网结构的差异,本研究试验对象为桁杆拖网,其网口的水平扩张主要依赖于刚性桁杆的支撑,垂直扩张则由重锤调节,而非完全依靠网身张力调控。因此,即使调整内衬网比例,其对网口垂直扩张的影响也相对有限。本研究发现,随着流速增大拖网整体呈收缩趋势,网线张力增加使网目趋于闭合,腹网区域易发生局部变形。这一现象的产生原因在于流速的增加导致拖网张力的增大,从而引起网目形态的变化。尤其在低重锤、高流速条件下更为明显。此时,由于重锤沉力不足,网口垂直方向的支撑力减弱,网具垂直方向的张力不足以平衡水流对网口的冲击力,从而导致网口垂直扩张程度下降,网具受流面积减小,拖网形态扩展不佳。与苏志鹏等^[11] 和刘征^[23] 的研究结果一致,进一步验证了流速是影响拖网网口扩张的重要因素。此外,重锤质量的增加有效增强了拖网的抗流稳定性。在水流作用下,较大的重锤质量能够提供更强的下拉力,使拖网在垂直方向上的张力增强,从而更好地维持网具结构张开状态,抑制腹网的收缩和局部变形,有助于拖网在复杂流场中保持形态稳定。同时,重锤质量的增加可明显提升网口高度,但提升幅度呈逐渐减小趋势,与周爱忠等^[24] 的试验结果一致。但冯超等^[19] 发现重锤质量对网口高度无明显影响,主要原因是受限于网口的纵向缩节,当重锤达到一定质量后,网口高度的提升趋于平缓。调节拖速和重锤质量是提高网口高度的常用方法,但是过重的重锤可能导致拖网的垂直扩张不稳定,尤其是在拖

速较快的情况下,影响拖网在水中的位置控制,会使网口出现不规则的形态或倾斜。因此,在实际应用中,需平衡网口扩张与作业稳定性之间的关系,避免重锤过重对网具性能和操作性造成负面影响^[25]。

由于网线具有柔性特质,其在水中作业时会与水流发生复杂的相互作用,导致拖网产生波动现象,这种波动会引起拖网所受阻力的持续波动,进而产生振荡现象。THIERRY等^[26]通过电磁流速计对底拖网周围流场进行测量,认为流场变化引起的拖网振荡会影响渔获物质量和网具性能。流速是影响拖网阻力振荡的直接因素,其变化可能引起拖网的快速振荡,增加网具形态的不稳定性,从而加剧拖网阻力的波动^[27]。本研究发现,拖网阻力的振幅随流速的增加而增大,与刘伟^[20]的研究结果一致。较高的流速往往会导致更强的水流湍动,进而增加拖网阻力的波动幅度。TANG等^[28]在对南极磷虾拖网的动力学研究中发现,拖网振荡强度与纲索张力和流速密切相关,较低的流速有利于拖网保持稳定。鉴于南极磷虾游泳能力较弱,低流速下能够更好地保持拖网的作业性能。

不同设计参数的变化通过改变拖网内外流场分布,进而影响拖网阻力及其振荡特性^[29]。本研究通过调整内衬网比例优化拖网网型结构,发现在相同条件下,100%内衬网时阻力振荡最剧烈。这主要是由于内衬网网目尺寸较小,阻碍水流通过,导致拖网内外流场差异较大,从而使得拖网阻力产生剧烈的振荡现象。相较于100%和90%内衬网,80%内衬网的拖网阻力更趋于稳定。因此,建议桁杆拖网采用80%内衬网安装方式。研究还发现重锤质量的增加能够降低阻力振幅。究其原因,尽管重锤质量增加增大了拖网的总阻力,但其通过增强网口垂直稳定性,从而提升了拖网的整体稳定性,减少了流速变化引起的动态影响,减弱了流速对拖网的扰动,使得阻力波动幅度减少,拖网阻力振荡变得更加平稳。拖网在水中运动时,渔获物对拖网稳定性的影响是不容忽视的。LIU等^[30]发现渔获物的存在降低了网囊尾部滤水性,从而导致尾部涡流的产生引起网囊位置发生振荡现象。张锋等^[31]通过探究模拟渔获物对拖网网囊振荡特性的影响,发现拖网网囊阻力振幅随渔获物质量的增加而增大。

这表明渔获物的积累不仅改变了拖网内部流场分布,还可能加剧拖网的波动,从而影响捕捞效率。因此,需要进一步开展当存在渔获物时,桁杆拖网网具稳定性研究,以符合实际作业。尽管本研究初步揭示了桁杆拖网在内衬网比例和重锤参数下的水动力特性和稳定性变化规律,但试验未涵盖泵吸装置工作状态下的桁杆拖网全系统动态特性,难以完全反映实际作业情况,研究存在一定局限性。在实际作业中,泵吸装置的装配及其泵吸管的安装方案会影响拖网自身水动力特性和周围的流场分布,进而影响拖网系统的稳定性。建议后续研究应进一步聚焦泵吸系统对桁杆拖网水动力特性与稳定性的影响机制,为开发高性能南极磷虾连续泵吸捕捞装备提供理论基础与技术依据。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 谌志新,王志勇,欧阳杰. 我国南极磷虾捕捞与加工装备科技发展研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 48-52.
CHEN Z X, WANG Z Y, OUYANG J. Development of technology for Antarctic Krill fishing and processing equipment in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 48-52.
- [2] 张馨月,郑汉丰,刘勤,等. 南极磷虾捕捞加工船利用现状及趋势分析[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(9): 114-120.
ZHANG X Y, ZHENG H F, LIU Q, et al. Utilization status and trend analysis of Antarctic Krill fishing and processing ships [J]. Ocean Development and Management, 2022, 39(9): 114-120.
- [3] KAWAGUCHI S, ATKINSON A, BAHLBURG D, et al. Climate change impacts on Antarctic krill behaviour and population dynamics [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2024, 5(1): 43-58.
- [4] 戴阳,姚宇青,郑汉丰,等. 基于三次B样条曲线与动态窗口算法的桁杆轨迹规划[J]. 南方水产科学, 2023, 19(2): 116-123.
DAI Y, YAO Y Q, ZHENG H F, et al. Truss rod trajectory planning based on cubic B-spline curve and Dynamic Window Algorithm [J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(2): 116-123.
- [5] 冯超. 南极磷虾桁杆拖网渔具结构与作业性能分析研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
FENG C. The analysis of gear structure and operating performance for Antarctic Krill beam trawls [D].

- Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [6] 周春凯,王威. 南极磷虾拖网加工船双桁架系统设计[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 91-97.
- ZHOU C K, WANG W. Twin-truss system design for Antarctic Krill trawl processing ship [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 91-97.
- [7] 王永进,张勋,张禹,等. 大网目底拖网主要结构参数对拖网性能的影响[J]. 南方水产科学, 2021, 17(4): 66-73.
- WANG Y J, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Influence of main structural parameters on performance of bottom trawl with large-size mesh [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(4): 66-73.
- [8] 朱美熹,唐浩,刘伟,等. 不同水平扩张比和模拟渔获物对南极磷虾拖网整体形态的影响[J]. 大连海洋大学报, 2023, 38(2): 331-339.
- ZHU M X, TANG H, LIU W, et al. Effects of horizontal opening ratio and simulated catch on whole configuration of Antarctic krill trawl net [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(2): 331-339.
- [9] THIERRY N N B, TANG H, XU L X, et al. Hydrodynamic performance of bottom trawls with different materials, mesh sizes, and twine thicknesses [J]. Fisheries Research, 2020, 221: 105403.
- [10] 李灵智,陈帅,杨嘉樑,等. 南极磷虾四片式小网目中层拖网作业性能分析[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 893-901.
- LI L Z, CHEN S, YANG J L, et al. Performance analysis of the four-panel mid-water trawl for Antarctic krill fishery [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(4): 893-901.
- [11] 苏志鹏,许柳雄,朱国平,等. 拖速和曳纲长度对南极磷虾中层拖网网位的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 884-892.
- SU Z P, XU L X, ZHU G P, et al. Effects of towing speed and warp length on the net position of Antarctic krill mid-trawl [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(4): 884-892.
- [12] 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.
- [13] 王忠秋,许柳雄,唐浩,等. 基于局部附网法的南极磷虾拖网网身大网目选择性[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 735-742.
- WANG Z Q, XU L X, TANG H, et al. Selectivity of Antarctic krill trawl body with large mesh using local-attached fine mesh net method [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(4): 735-742.
- [14] GRIMALDO E, GRIMSMO L, ALVAREZ P, et al. Investigating the potential for a commercial fishery in the Northeast Atlantic utilizing mesopelagic species [J]. Ices Journal of Marine Science, 2020, 77(7/8): 2541-2556.
- [15] GRIMALDO E, HERRMANN B, BRČIĆ J, et al. Prediction of potential net panel selectivity in mesopelagic trawls [J]. Ocean Engineering, 2022, 260: 111964.
- [16] TANG H, NSANGUE B T N, PANDONG A N, et al. Flume tank evaluation on the effect of liners on the physical performance of the Antarctic krill trawl [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 8: 829615.
- [17] 徐鹏翔,许柳雄,孟涛,等. 日韩小网目南极磷虾拖网性能对比分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 837-846.
- XU P X, XU L X, MENG T, et al. Comparative analysis on the performance of Japan and South Korea Antarctic krill mid-water trawls with small mesh sizes [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 837-846.
- [18] 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.
- [19] 冯超,李灵智,张港琛,等. 南极磷虾桁杆拖网网型结构与作业性能之间的关系[J]. 水产学报, 2022, 46(3): 494-504.
- FENG C, LI L Z, ZHANG G C, et al. Effect analysis of gear structure and sinker on the performance of Antarctic krill beam trawl [J]. Journal of Fishery of China, 2022, 46(3): 494-504.
- [20] 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.
- LIU W. Study on oscillation and stability of mid-trawl codend [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [21] 冯春雷,刘健,张禹,等. 南极磷虾拖网结构优化设计与网具性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 75-81.
- FENG C L, LIU J, ZHANG Y, et al. Structure improvement design and performance experiment of Antarctic krill trawl net [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 75-81.
- [22] 林可,倪益,雷靖,等. 高强度PA单丝拖网水槽试验研究[J]. 渔业现代化, 2017, 44(1): 51-58.
- LIN K, NI Y, LEI J, et al. Flume experimental research on high-strength PA monofilament trawl [J]. Fishery Modernization, 2017, 44(1): 51-58.
- [23] 刘征. 南极磷虾桁杆拖网水动力性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- LIU Z. Study on hydrodynamic characteristics of beam-trawl for Antarctic krill [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.

- [24] 周爱忠, 冯春雷, 张勋, 等. 调整作业参数对小网目南极磷虾拖网水动力性能的影响[J]. 海洋渔业, 2016, 38(1): 74-82.
- ZHOU A Z, FENG C L, ZHANG X, et al. Influence of adjustment of operation parameters on small-mesh Antarctic krill trawl[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(1): 74-82.
- [25] 程军, 宋伟华, 李灵智, 等. 网口结构变化对南极磷虾桁杆拖网水动力性能的影响[J]. 渔业现代化, 2022, 49(4): 96-103.
- CHENG J, SONG W H, LI L Z, et al. Influence of net mouth structure change on hydrodynamic performance of Antarctic krill beam trawl[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(4): 96-103.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] TANG H, THIERRY N N B, ACHILLE N P, et al. Coupled dynamics of the moving Antarctic krill trawl structure and its hydrodynamics behavior using various catch sizes and door spreads based on wavelet-based and fourier analysis [J]. Journal of Fluids and Structures, 2024, 124: 104037.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- 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.

Hydrodynamic performance analysis of model nets of the Antarctic krill beam trawl with different liner net ratios in flume tank experiments

WANG Chenxin¹, TANG Hao^{1,2,3}, LIU Wei⁴, WANG Zhongqiu⁴, WANG Lumin⁴, HU Fuxiang^{1,2,3}, XU Liuxiong^{1,2,3}

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

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: To investigate the optimal assembly proportions of inner liners in Antarctic krill beam trawls and achieve the goal of green, low-carbon fishing, this study focuses on the beam trawl used by the Antarctic krill fishing and processing vessel "Deep Blue". The trawl model with a scaling ratio of 15 was developed based on the modified Tanaka criterion, and experiments were conducted in a circulating flume tank to investigate the effects of liner net proportions (100%, 90%, 80%) and sinker mass (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg) on the overall geometry, drag, energy consumption coefficient, and stability of the beam trawl model. The results indicate: (1) A reduction in the liner net proportion led to decreases in drag and energy consumption coefficient, while the net mouth height remained relatively unchanged. Under identical conditions, a 20% reduction in liner net proportion resulted in a 12.02% decrease in drag and a 5.66% reduction in the energy consumption coefficient. (2) With increasing flow velocity, the beam trawl model exhibited a reduction in net mouth height, greater overall contraction and increased drag. (3) Increased sinker mass was positively correlated with drag, net mouth height, and energy consumption coefficient. (4) Reducing the liner net proportion while increasing sinker mass resulted in more stable resistance oscillations with reduced amplitude. Appropriately reducing the liner net ratio and increasing the sinker mass can help reduce trawl drag and energy consumption. This study provides foundational theoretical guidance for optimizing the design of beam trawl gear for Antarctic krill harvesting.

Key words: Antarctic krill beam trawl; liner net proportions; sinker mass; flume tank model experiment; hydrodynamic performance