

蟹塘双体投饵船行驶阻力分析及船型优化

李俊, 朱逸凡, 陈雷雷, 胡庆松

Analysis of driving resistance and optimization of boat type for crab pond catamaran bait boat

LI Jun, ZHU Yifan, CHEN Leilei, HU Qingsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201203238>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

虾蟹塘投饵船三叶螺旋桨设计及水动力仿真分析

Hydrodynamic simulation analysis of three-blade propeller of shrimp and crab pond feeding boat

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 893 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503028>

船载投饵装置平衡抖料系统设计与试验

Design and test of balanced shaking system for boat-borne bait feeding device

上海海洋大学学报. 2020, 29(6): 928 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190802773>

基于蒙特卡洛方法的集鱼灯海面照度模型建立

Establishment of sea surface illuminance model of fishing lamps based on Monte Carlo method

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1055 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201203240>

仿生鱿鱼流体形态建模与数值模拟

Fluid morphology modeling and numerical simulation of biomimetic squid

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 884 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201103225>

全海深ARV被动升沉补偿系统缆绳张力控制分析

Cable tension control analysis of the passive heave compensation of ARV for full ocean depth

上海海洋大学学报. 2017, 26(2): 287 <https://doi.org/10.12024/jsou.20160401725>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0269-09

DOI:10.12024/jsou.20201203238

蟹塘双体投饵船行驶阻力分析及船型优化

李俊, 朱逸凡, 陈雷雷, 胡庆松

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 采用双体投饵船是实现蟹塘遍撒投饵的可行方案之一。在航道存在水草的情况下, 为减小巡航阻力、提升投饵船续航能力, 设计尖底和圆棱底 2 种新型船底型线, 并基于雷诺平均方程, 构建船体在不同吃水深度和速度下的动力学计算模型。以平底船为对照船体, 对比分析 CFD 数值计算与水池试验阻力, 数据误差在 9.6% 以内, 显示了计算模型的有效性。计算结果表明: 圆棱底船在船速 0.50 ~ 2.00 m/s 时具有更好的减阻效果, 与平底船相比减阻率在 3.92% ~ 16.27%; 圆棱底船能减小底面与水草的滑动摩擦阻力; 投饵船经济船速应小于 1.50 m/s, 经济吃水深度应小于 0.18 m。所研发的圆棱底船的进一步测试结果表明了所提优化方案的有效性。

关键词: 双体投饵船; 行驶阻力; 船型优化; 平底船; 尖底船; 圆棱底船

中图分类号: U661.31 **文献标志码:** A

河蟹养殖是水产养殖的重要组成部分, 相比鱼类养殖, 河蟹养殖在投喂技术上存在难点^[1-2]。河蟹一般均匀分布于整个池塘, 采用定点投喂方式难以覆盖, 目前蟹塘采用的投喂方式仍然是人工投喂为主, 劳动强度大, 难以做到抛撒均匀, 易造成饵料残余, 并造成水体污染, 增加养殖风险^[3]。对蟹塘养殖方式进行优化有助于推进河蟹养殖业的发展, 自主导航投饵船能实现全塘均匀投饵, 是未来蟹塘投喂方式的重要发展趋势^[4]。

近年来, 国内开始针对小型投饵船进行研究。李明等^[5]在国内外投喂机械研究的基础上, 融合 GPS 导航、自动化控制、信息通信等现代技术, 研发出一款螺旋桨推进的鱼塘自动巡航式单体投饵船。胡庆松等^[6]针对虾塘水面存在增氧机固定绳等严重影响投饵船行驶的障碍物这一情况, 设计出明轮驱动的全封闭尖底双体投饵船, 并对其行驶可靠性进行了验证。不同环境的养殖塘对投饵船的功能需求存在差异, 需要针对特定养殖需求进行细化研究。目前针对蟹塘小

型投饵船的研究较少, 蟹塘和虾塘不同, 一般育有大片水草区。水草区可以净化蟹塘水质, 增加水体溶氧量, 遮阳降温, 为河蟹提供植物性饲料和安全的栖息、蜕壳场所^[7]。蟹塘投饵船的行驶水道是规划好的无水草区域, 但水草区的浮水茎叶和漂流过来的少量水草会与投饵船船底接触, 增加投饵船的行驶阻力, 尤其是摩擦阻力, 因此针对蟹塘投饵船的研究, 船底减阻是主要研究目的之一。

对船体阻力进行研究, 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术是目前的主要手段, 它能观察到船体局部区域的流场变化, 模拟计算结果可信度和准确性高^[8-12]。肖国权等^[13]基于 SolidWorks 软件设计了一款小型双体无人船并建立水动力学模型, 研究发现船体阻力随吃水深度和船速增大产生波动且存在阻力急剧增大的拐点。方静等^[14]利用 CFD 仿真软件分析对比两款船体的行驶阻力, 发现改变片体艏部型线能显著降低船体兴波阻力。上述研究表明船体的型线、吃水深度、船速都会对小型无人

收稿日期: 2020-12-05 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51309150); 国家重点研发计划(2019YFD0900401); 上海市科技兴农推广项目(沪农科推字[2018]第 3-3 号)

作者简介: 李俊(1982—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: junli@shou.edu.cn

通信作者: 胡庆松, E-mail: qshu@shou.edu.cn

船行驶阻力产生较大的影响。蟹塘养殖的投饵量随天气和养殖阶段动态变化,通过改变投饵船搭载质量和船速来控制投饵量,不合理的船速和搭载质量的改变都会增加投饵船行驶阻力,降低工作效率。本文基于蟹塘投饵船的实际工况,设计了两款新型船底型线,分析对比不同船底型线和型线尺寸在不同船速和吃水深度时对投饵船行驶阻力的影响,研究蟹塘投饵船作业时的适宜船型、船速和吃水深度,以减小蟹塘投饵船的行驶阻力,提升续航能力。

1 材料与方 法

1.1 投饵船模型

本文对双体平底小型投饵船进行计算模型构建,利用平底船试验验证流体计算模型的有效性,进一步对尖底和圆棱底船体进行计算和分析。平底船体为 PE 材料滚塑而成,片体通过 700 mm × 40 mm × 20 mm 不锈钢方钢连接,片体形状与主尺寸如图 1a 所示。投饵船设计船速 0.50 ~ 2.00 m/s,最大搭载质量 35 kg,船体空载吃水深度 0.1 m,满载吃水深度 0.22 m。为方便计算,对三维船模进行简化,简化后的三维船模如图 1b 所示,实船与船模尺寸比例 1:1,以减小尺寸变化引起的误差。

船底减阻是蟹塘投饵船研究的重要对象,基于流线型会减轻水流脱流现象,水体流动时能较好地贴合船体表面,降低前后压差,减小行驶阻力这一特性,保持船体长宽等参数不变,将平底改造为尖底和圆棱底 2 种新的流线型态,如图 2 所示。这 2 款船型能够增加投饵船空载时的吃水深度,降低船体重心,提高行驶稳定性,确保空载时螺旋桨能完全浸没在水中,减小动力浪费。吃水深度加深,螺旋桨的安装高度高于平底船,能有效减少搬运船体时螺旋桨与地面碰撞导致的损坏。

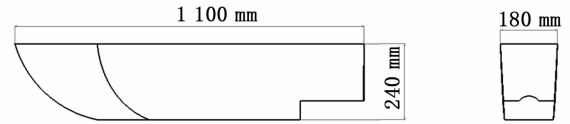
1.2 计算方案设计

本文设计的 2 款船型:尖底船(图 2a)尺寸由 L 控制,选取 L 为 5、10、15、20、25 mm 共计 5 种尺寸进行仿真计算;圆底船(图 2b)尺寸由 R_1 、 R_2 两段圆弧共同控制,取 R_1 为 5、10、15、20、25 mm, R_2 为 20、25 mm 组合共计 10 种尺寸。采用 15 组尺寸进行仿真计算,着力减小由于尺寸单一计算结果具有偶然性从而对研究结论产生影响。

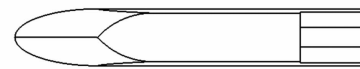
1.3 控制方程和湍流模型

对不可压缩黏性流体采用平均雷诺(reynolds-averaged navier-stokes, RANS)方程,这是业内现阶段用于船舶仿真的主流控制方程^[15],其在直角坐标系中表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$



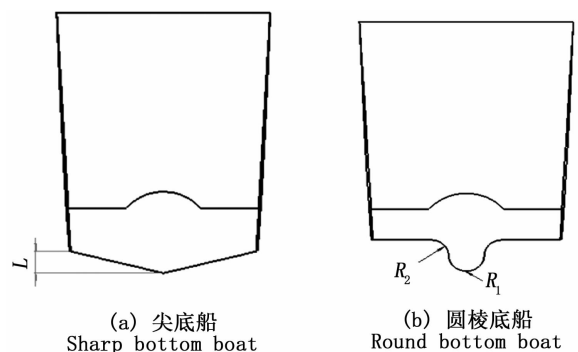
(a) 平底船船型 Type of flat bottom boat



(b) 简化船模 Simplified model of flat bottom boat

图 1 平底船船模

Fig.1 Model of flat bottom boat



(a) 尖底船
Sharp bottom boat

(b) 圆棱底船
Round bottom boat

图 2 船底形状

Fig.2 Bottom shape of the boat

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ν 为流体运动黏性系数, m^2/s ; p 为流体压力, N/m^2 ; f_i 为质量力, m/s^2 ; u_i, u_j 为时均速度, m/s ; u_i', u_j' 为脉动速度, m/s 。

湍流模型选择重整化群两方程模型 (renormalization group $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$), 它具有较好的稳定性和准确度, 经标准 $k-\varepsilon$ 模型改进而来, 其湍动能和耗散率的控制方程^[15-16] 为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能, J ; ε 为湍流耗散率; G_k 为层流速度梯度引起的湍流动能, J ; μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; $C_{1\varepsilon}^*$ 是 $C_{1\varepsilon}$ 的修正值; 常量 $C_{1\varepsilon} = 1.42$; $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7179$ 。

1.4 计算域及网格划分

运用 Geometry 软件设置计算域, 计算域的具体尺寸: 沿船首延伸 1 倍船长, 沿船尾延伸 4 倍船长, 船体左右两侧各延伸 1 倍船长, 沿着竖直方向上下各延伸 0.5 倍船长。计算域包括气相和液相两部分, 以船体吃水线作为气液分界面。计算域模型如图 3 所示。

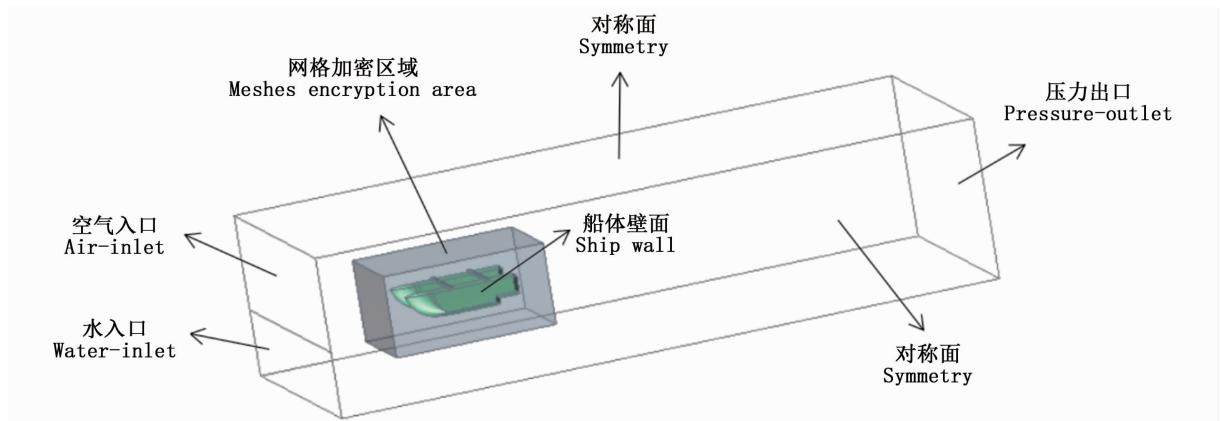


图 3 计算域和边界条件
Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

网格采用分块划分的方式, 在计算域中设置一小型长方体包裹住船体, 如图 3 所示, 用小体积四面体网格划分, 其余区域用大体积六面体网格划分, 如图 4 所示。这种划分方式能有效降低网格数量, 减少计算时间, 本文网格划分数量不同计算组别均在 93 万 ~ 100 万。

在分块划分的基础上开展网格无关性验证,

选取粗网格、中网格、细网格等 3 种网格尺寸进行数值计算并分析网格尺寸对平底船空载行驶阻力模拟计算收敛性的影响, 结果如表 1 所示。计算结果误差随网格数量增加而减小, 中网格与细网格的计算误差仅 0.8%, 但计算时间翻倍, 因此后续计算的网格尺寸选取中网格。

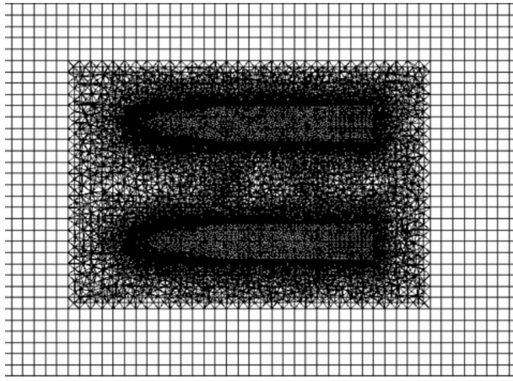


图4 计算域网格剖面图

Fig. 4 Profile of computational domain meshes

表1 网格无关性验证

Tab. 1 Meshes independence verification

网格类型 Type of meshes	网格数量 Number of meshes	阻力计算结果 Resistance calculation results/N	计算时间 Computing time/h
粗网格 Coarse mesh	491 281	14.99	4
中网格 Mid mesh	939 526	14.20	7
细网格 Fine mesh	1 752 582	14.08	16

1.5 参数选取及边界条件设定

仿真计算求解器选择非稳态求解,选择多相

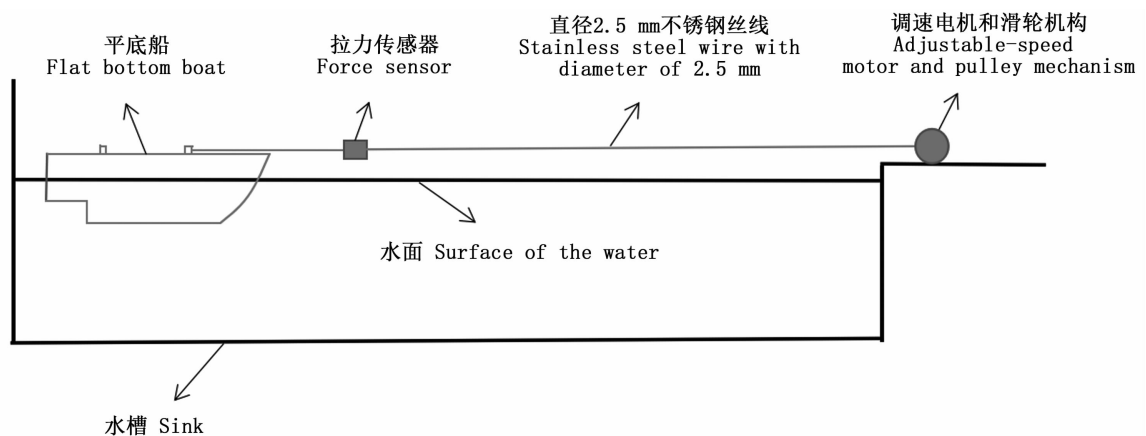


图5 船体拖拽实验

Fig. 5 Towing experiment

平底船水槽拖拽实验与仿真计算结果如图6所示,实验结果与仿真计算的阻力变化趋势呈较高的一致性,误差率为5.9%~9.6%,随船速增加而增加,在船速为1.50 m/s时误差最大。由于实船试验受各类因素的影响,如电机实际转速与数显调速器显示的转速存在偏差、滑轮表面并不

流模型 Volume of Fluid, 投饵船工作环境为水和空气,空气密度为 1.225 kg/m^3 , 水密度为 998.2 kg/m^3 。将空气速度入口和水速度入口设定为速度入口,并设置空气速度入口的水含量为0,水速度入口的水含量为1。出口边界为压力出口。船体表面和计算域下底面设定为壁面,计算域左右两面与上顶面设定为对称面。边界条件设置如图3所示。

2 结果

2.1 模型数据验证

为验证计算模型的有效性,在上海海洋大学水槽中进行船体拖拽实验,使用减速比7.5:1的调速电机,控制电机轴带动直径120 mm的滑轮机构转动,对平底船进行拖拽使其在长20 m的水槽中分别以0.50、0.75、1.00、1.25和1.50 m/s的船速匀速前进,如图5所示。滑轮机构与船体用压力传感器连接,通过压力传感器获取不同速度下的拉力数值,本文使用的拉力传感器精度误差为0.03 N,满足对船体阻力变化进行精准观测的要求。

完全光滑,存在摩擦阻力等,试验与模拟计算结果产生误差的原因不易分析,但其总体误差率在10%以下,可以认为模拟计算结果具有可信度,文中所建立的水动力学计算模型有效。

2.2 不同船底型线尺寸阻力

设定平底船船速1.50 m/s、吃水深度0.1 m,

研究在相同排水体积(船体搭载质量相同)和船速下船底型线对总阻力的影响,3种船型的片体中纵截面的速度云图如图7所示。与平底船相较,圆棱底船船尾处形成更明显的涡流,涡流会增加船体尾部压力,减小投饵船首尾压力差,从而降低投饵船的兴波阻力;平底船、尖底船和圆棱底船船尾涡流处的流速分别为 $0 \sim 0.526 \text{ m/s}$ 、 $0 \sim 0.632 \text{ m/s}$ 和 $0 \sim 0.842 \text{ m/s}$,圆棱底船船尾涡流处流速更快,对船体的提速性更好。

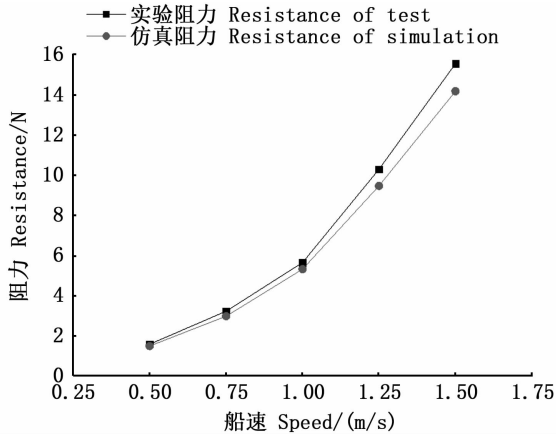


图6 计算值与实验值对比
Fig.6 Comparison between calculated and test values

3种船型在不同船底尺寸下的阻力对比如图8所示。船速 1.50 m/s 时,尖底船和圆棱底船均具有减阻效果,尖底船的减阻率为 $1.13\% \sim 12.18\%$,圆棱底船的减阻率为 $6.13\% \sim 12.25\%$ 。同一种船底型线,型线的尺寸变化也能减小行驶阻力:随着 L 增加,尖底船减阻率升高 11.05% ;随着 R_1 增加,圆棱底船减阻率升高 6.12% 。这说明船底型线尺寸也是船体优化设计中的重要研究对象。

2.3 不同船速下阻力

基于上文结果,选取 R_1 为 25 mm 、 R_2 为 20 mm 的圆棱底船和 L 为 25 mm 的尖底船作为研究对象,在相同载重量下,计算投饵船在船速 $0.50 \sim 2.00 \text{ m/s}$ 内的阻力,结果如图9所示。船速 $0.50 \sim 1.50 \text{ m/s}$ 内,船体总阻力增加 $1.42 \sim 12.67 \text{ N}$;船速 $1.50 \sim 2.00 \text{ m/s}$ 内,船体总阻力增加 $21.89 \sim 41.23 \text{ N}$,其中船速在 $1.50 \sim 1.75 \text{ m/s}$ 的阻力增长率为 $87.48\% \sim 120.3\%$,阻力增长率高会迅速增加投饵船耗电量、降低续航时间,

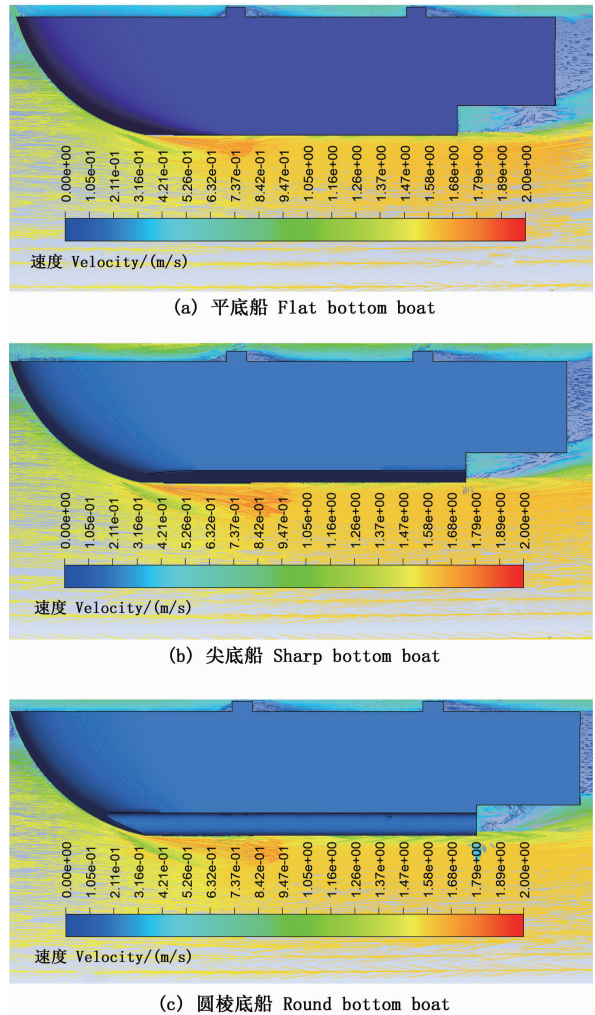


图7 不同类型船底速度云图

Fig.7 Velocity nephogram with different bottom types

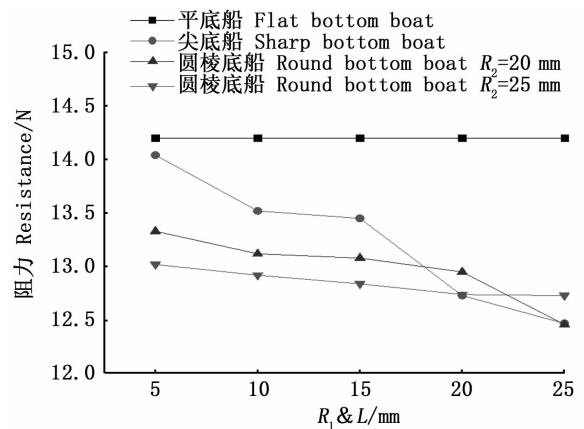


图8 3种投饵船在不同船底尺寸下的阻力
Fig.8 Resistance of three kinds of bait boats in different bottom sizes

不符合投饵船长时间续航这一设计要求。因此,为了提高投饵船的抗风浪性能,投饵船的最大船速可以达到 2.00 m/s,但投饵船的经济船速应小于 1.50 m/s。

与平底船相较,尖底船在船速 1.50 ~ 2.00 m/s 时具有减阻效果,在船速 2.00 m/s 时取得最大减阻值 2.33 N;圆棱底船在船速 0.50 ~ 2.00 m/s 时始终具有减阻效果,减阻值随船速增加而增加,在船速 2.00 m/s 时取得最大减阻值 4.69 N,减阻率为 3.92% ~ 16.27%。对比分析可知,圆棱底船的减阻效果更加理想。

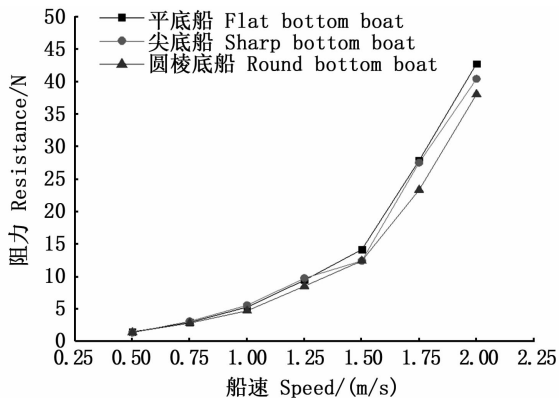


图9 3种投饵船不同船速下的阻力
Fig.9 Resistance of three kinds of bait boat at different speeds

2.4 不同吃水深度下阻力

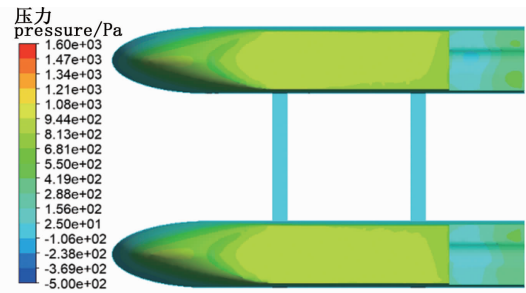
投饵船行驶时,船底与塘内水草接触,产生滑动摩擦阻力,摩擦力的计算公式如式 5 所示,摩擦阻力大小与船底压力成正比。

$$F = \mu \times N \quad (5)$$

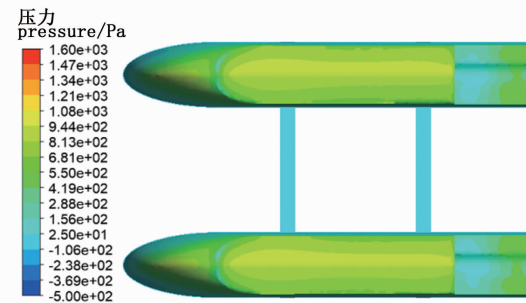
式中: μ 为滑动摩擦系数,只与材料、接触面粗糙度有关; N 为压力, N 。

以3种船体在吃水深度 0.10 m 下的船底压力分布图(图 10)为例研究船底型线对水草阻力的影响。其中,平底船船底压力分布平均为 813 ~ 944 Pa,尖底船船底尖棱处压力升高至 944 ~ 1 080 Pa,其余部分压力降低至 681 ~ 813 Pa,圆棱底船船底圆棱处压力升高至 944 ~ 1 080 Pa,其余部分压力降低至 550 ~ 681 Pa。压力值取压力区间的中间值,与平底船相比,尖底船船底尖棱处压力升高 15.19%,剩余部分压力降低 14.96%;圆棱底船船底圆棱处压力升高 13.15% 剩余部分压力降低 32.60%,由于尖棱与圆棱面

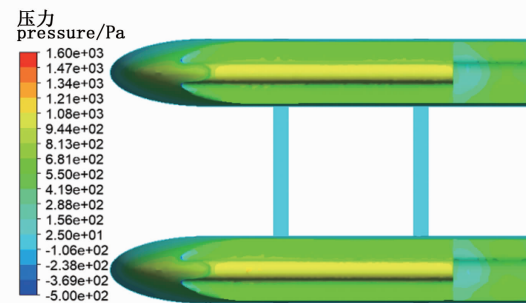
积占船底总面积比重较小,因此尖底船和圆棱底船均可有效减小船底与水草的总滑动摩擦阻力。



(a) 平底船 Flat bottom boat



(b) 尖底船 Sharp bottom boat



(c) 圆棱底船 Round bottom boat

图 10 3种船型的船底压力

Fig.10 Bottom pressure of three boat types

表 2 是船速 1.50 m/s 时 3 种船型在不同吃水深度下的阻力计算结果。吃水深度 0.1 ~ 0.18 m 内,平底、尖底和圆棱底船的阻力增值分别为 2.49 ~ 15.49 N、2.49 ~ 13.57 N、2.07 ~ 12.05 N,吃水深度 0.18 ~ 0.22 m 内,阻力增值分别为 26.66 ~ 37.83 N、24.75 ~ 35.88 N、21.08 ~ 27.75 N,对比可知 3 种船体均在吃水深度 0.18 m 以上的阻力增值过高。在实际工况下,吃水过深还会导致船体兴起的波浪溅射到船体顶面,对船体顶面舱盖的密封性形成考验,因此 3 种船型的经济吃水深度应不大于 0.18 m。

2.5 圆棱底船阻力数据对比分析

基于以上结果,在设计一款适合大水面养殖的蟹塘投饵船时采用圆棱底作为船底型线,船体设计载重量 100 kg,空载吃水 0.12 m,满载吃水 0.26 m,船总长 1.6 m、宽 1 m、高 0.28 m,片体形状如图 11 所示。

表 2 3 种投饵船不同吃水深度的阻力

Tab.2 Resistance of three kinds of bait boat under different draught depths

吃水深度 Draught/m	平底船阻力 Resistance of flat bottom boat/N	尖底船阻力 Resistance of sharp bottom boat/N	圆棱底船阻力 Resistance of round bottom boat/N
0.10	14.20	12.14	10.59
0.12	16.69	14.63	12.66
0.14	19.50	17.36	15.01
0.16	27.30	22.60	19.26
0.18	29.69	25.71	22.64
0.20	40.86	36.89	31.67
0.22	52.03	48.02	38.34

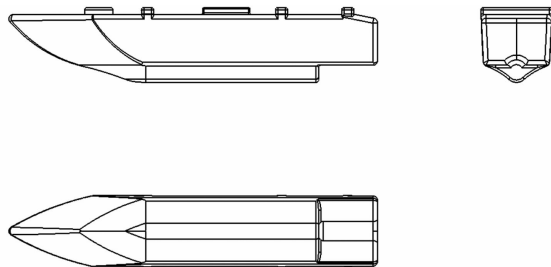


图 11 大型圆棱底投饵船示意图

Fig.11 Schematic diagram of large round bottom bait boat

为验证大型圆棱底船的减阻效果,在上海海洋大学池塘中进行区间测速试验,大型圆棱底投饵船与小型平底投饵船同样搭载型号为 MY6812、转速 3 000 r/min 的有刷电机,分别定位 2 个相同的坐标进行自主导航,分空载和满载两种情况进行区间测速,区间行程为 20 m,为保证实验结果准确性,船速取 3 次测量的平均值,实验现场如图 12 所示。

区间测速试验结果如表 3 所示。小型平底船和大型圆棱底船在相同动力系统下的空载平均船速分别为 1.35 m/s 和 1.28 m/s,满载平均船速分别为 0.96 m/s 和 0.94 m/s,2 种投饵船的船速差距小于 5.4%,显示了圆棱底船良好的减阻性能,进一步验证了本文研究结果的正确性。

3 讨论

针对蟹塘投饵工况,设计了尖底与圆棱底 2 种新型船底,建立了投饵船在不同型线尺寸、船速 0.50 ~ 2.00 m/s 及吃水深度 0.10 ~ 0.22 m 下的水动力学计算模型。分析船底型线对船尾流场和船底摩擦阻力的影响,得出以下结论:



(a) 小型平底船 Small flat bottom boat



(b) 大型圆棱底船 Large round bottom boat

图 12 船速对比实验现场

Fig.12 Site of speed comparison experiment

表 3 相同动力下大型圆棱底船与小型平底船船速实验数据

Tab.3 Experimental data of speed of large round bottom boat and small flat bottom boat under the same dynamic force

船型 Type of boat	载重 Load/kg	平均船速 Average speed/(m/s)
小型平底船 Small flat bottom boat	0	1.35
大型圆棱底船 Large round bottom boat	35	0.96
大型圆棱底船 Large round bottom boat	0	1.28
大型圆棱底船 Large round bottom boat	100	0.94

(1) 圆棱底船具有更好的船尾流场,能有效降低投饵船的兴波阻力。船底型线尺寸变化会对减阻效果产生较大影响,随 L 和 R_1 增加,尖底船和圆棱底船的减阻率升高。

(2) 圆棱底船的减阻效果优于尖底船,减阻率为 3.92% ~ 16.27%。3 种船型均在船速 1.5 m/s 以上时阻力增长率过高,不符合投饵船长时间续航的特性,所以投饵船的经济船速应小于 1.5 m/s。

(3) 在相同吃水深度下,尖底船和圆棱底船可以有效减小船底表面与水草间的总滑动摩擦阻力。3 种船型均在吃水深度 0.18 m 以上时阻力增长率过高,综合阻力和船体密封性考虑,投饵船的经济吃水深度应小于 0.18 m。

基于 CFD 软件的模拟计算能准确观察船体局部流场的变化,对蟹塘投饵船阻力研究具有较好的运用价值。在后续投饵船设计中,应综合考虑船体型线、经济船速与吃水深度等几个方面的因素,以减小投饵船行驶阻力,从而提升投饵船续航能力。

参考文献:

- [1] CHEN Y S, QU X, XIONG F Y, et al. Challenges to saving China's freshwater biodiversity: Fishery exploitation and landscape pressures[J]. *Ambio*, 2020, 49(4): 926-938.
- [2] 田昌凤, 车轩, 刘兴国, 等. 池塘养殖沉积物收集装置的研制[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(1): 103-108.
TIAN C F, CHE X, LIU X G, et al. Design of sediment collection device for pond culture[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(1): 103-108.
- [3] 陈晓龙, 陈军, 唐荣, 等. 对虾船载投饵机的研制[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(1): 152-160.
CHEN X L, CHEN J, TANG R, et al. Development of boat-borne feeding machine for shrimps[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(1): 152-160.
- [4] 袁凯, 庄保陆, 倪琦, 等. 室内工厂化水产养殖自动投饵系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 169-176.
YUAN K, ZHUANG B L, NI Q, et al. Design and experiments of automatic feeding system for indoor industrialization aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 169-176.
- [5] 李明, 郑文钟, 洪一前. 自动巡航式无人驾驶投饵船的研制[J]. *现代农机*, 2018(2): 48-51.
LI M, ZHENG W Z, HONG Y Q. Development of an automatic cruise and unmanned bait-dropping ship [J]. *Modern Agricultural Machinery*, 2018(2): 48-51.
- [6] 胡庆松, 曹佳瑞, 郑波, 等. 明轮驱动虾塘自主导航投饵船设计与可靠性试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 121-128.
HU Q S, CAO J R, ZHENG B, et al. Design and reliability test of paddle wheel driven shrimp pond autonomous navigation feeding boat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 121-128.
- [7] 马亚梅. 虾蟹养殖中池塘水质与底质的调控[J]. *中国水产*, 2011(4): 49-51.
- [8] CHENG X D, FENG B W, CHANG H C, et al. Multi-objective optimisation of ship resistance performance based on CFD[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(1): 152-165.
- [9] ZHUANG Y, WAN D C. Numerical study on ship motion fully coupled with INGtank sloshing in CFD method[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2019, 16(6): 1840022.
- [10] 赵涛, 何龙, 李卫, 等. 一种半潜式无人艇的设计[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(2): 313-319.
ZHAO T, HE L, LI W, et al. Design of an unmanned semi-submersible vehicle [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(2): 313-319.
- [11] 吴乘胜, 邱耿耀, 魏泽, 等. 船模阻力数值水池试验不确定度评估[J]. *船舶力学*, 2015, 19(10): 1197-1208.
WU C S, QIU G Y, WEI Z, et al. Uncertainty analysis on numerical computation of ship model resistance[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(10): 1197-1208.
- [12] 林鹏, 倪其军, 李胜忠, 等. 小水线面双体船纵向航态与阻力特性的 CFD 分析[J]. *船舶力学*, 2017, 21(2): 168-174.
LIN P, NI Q J, LI S Z, et al. Numerical simulation of resistance for the SWATH with consideration of navigation attitude[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(2): 168-174.
- [13] 肖国权, 李天成, 黎日升, 等. 小型无人船阻力 CFD 模拟方法[J]. *中国测试*, 2018, 44(12): 69-74.
XIAO G Q, LI T C, LI R S, et al. CFD simulation method on resistance of small unmanned ship [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2018, 44(12): 69-74.
- [14] 方静, 黄晶, 冯佰威, 等. 基于 CFD 的超小型双体无人船总体设计[J]. *船舶工程*, 2018, 40(5): 1-3, 56.
FANG J, HUANG J, FENG B W, et al. General design of unmanned ultra-small catamaran ship based on CFD [J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(5): 1-3, 56.
- [15] 胡俊明, 李铁骊, 林焰, 等. 基于 RANS 法和边界层理论预报三维船体阻力[J]. *船舶力学*, 2018, 22(5): 552-559.
HU J M, LI T L, LIN Y, et al. Prediction and validation of resistance of 3-D hull based on RANS method and boundary layer theory[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(5): 552-559.
- [16] 李超, 周其斗, 潘雨村, 等. 三种湍流模型对导管螺旋桨空化性能计算的比较[J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(2): 73-79.
LI C, ZHOU Q D, PAN Y C, et al. Effects of three turbulence models on the cavitation performance evaluation for ducted propellers [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(2): 73-79.

Analysis of driving resistance and optimization of boat type for crab pond catamaran bait boat

LI Jun, ZHU Yifan, CHEN Leilei, HU Qingsong

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The catamaran bait boat is one of the feasible schemes to realize bait sprinkling in the crab pond. In the presence of water plants in the channel, in order to reduce the cruise resistance and improve the endurance of the bait boat, two new bottom profiles, sharp bottom and round bottom, were designed in this paper. Based on the Reynolds average N-S equation, the dynamic calculation models of the boat under different draughts and speeds are constructed. Taking the flat bottom boat as the contrast boat, the CFD numerical calculation and the sink test resistance are compared and analyzed, and the data error is less than 9.6%, which shows the effectiveness of the calculation model. The results show that: the round bottom boat has better resistance reduction effect at the speed of 0.50 – 2.00 m/s, and the resistance reduction rate is 3.92% – 16.27% compared with the flat bottom boat; the round bottom boat can reduce the sliding friction resistance between bottom and water plants; the economy of bait boat is at the speed of less than 1.50 m/s and the draft is less than 0.18 m. The further test results of the round bottom boat show the effectiveness of the proposed optimization scheme.

Key words: catamaran bait boat; driving resistance; boat form optimization; flat bottom boat; sharp bottom boat; round bottom boat