

文章编号: 1674-5566(2023)05-0923-09

DOI: 10.12024/jsou.20230604256

蟹塘梳草船驱动系统设计与试验

胡庆松¹, 黄克诚¹, 吴刚², 高佳宝³, 张铮¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 常州华溪渔业有限公司, 江苏 常州 213300; 3. 光明食品集团上海崇明农场有限公司, 上海 202179)

摘要: 水草管理是河蟹养殖的重要环节, 为降低水草收集设备操控劳动强度, 降低人员使用量, 研发梳草船的风机驱动系统。该驱动系统主要由风机叶片、防护装置、支架、电机、减速传动和防水密封罩等组成。通过 CFD 流体仿真计算并验证实体船的阻力情况, 进行风机选型, 其额定功率为 1 100 W, 工作电压 48 V, 叶片最大宽度 100 mm, 叶根倾斜角 28°, 设计具有自锁功能的转向系统。使用该驱动系统在河蟹养殖塘进行测试表明: 48 V/24 Ah 动力电池下其连续工作时间为 1.5 h; 无水草情况下空载和满载船速分别为 1.14 和 0.43 m/s; 轻度水草(水草顶端距离水面 >3 cm 且 <8 cm) 情况下空载和满载的最大船速分别为 1.06 和 0.26 m/s; 密集水草(水草顶端距离水面 ≤3 cm) 情况下空载和满载的最大船速分别为 0.71 和 0.12 m/s, 同时可以保持前进姿态持续打捞水草; 平均转弯半径 1.2 m。现场应用表明该驱动系统满足蟹塘实际水草环境下梳草船的驱动需求, 单位时间内与人工清理水草质量相比提高 94.3%, 为实现自动化水草管理打下了基础。

关键词: 蟹塘; 水草; 梳草船; 风机驱动; 叶根倾斜角

中图分类号: S 969 **文献标志码:** A

养蟹先养草, 良好的水草管理是河蟹养殖的关键之一^[1]。河蟹养殖池塘水草覆盖率可达 60% 以上, 适量的水草可增加水体中的溶解氧含量, 降解水体中的有害物质, 吸附重金属, 净化水质^[2]。但是, 水草生长过快也会带来严重的负面影响, 特别是每年 5—9 月, 露出水面部分的水草会覆盖蟹塘表面, 阻碍空气中的氧气溶入水体; 水草过于茂密, 其末端也容易死亡腐败, 导致水质恶化^[3]。清理水草所需劳动强度大, 在一线养殖人员年龄不断增大的现实下, 工作方式亟须进行改变。

当前水草管控一般采用 3 种方式^[4-7]: 第一种是靠人工推船捕捞, 由于水草种植密度的影响需要 1 人下水推船, 2 人在船上打捞, 仅靠工人经验, 劳动强度大且在水草生长旺季跟不上水草的生长速度, 同时无法保证打捞的均匀度; 第二种是靠化学药剂除草, 这种方式对河蟹的生长有一

定的影响且会影响整塘的水体; 第三种是机械化打捞, 如芬兰 RS-Planering 公司的割草船 RS5000 和德国 Berky 公司的 TYPE6400 采用单液压螺旋桨驱动。对于我国生产的 DF-SHS85 型全自动收割船和 DFGC-40 型半自动割草船, 前者吃水较深, 由螺旋桨驱动导致无法在浅水区域以及水下水草密集水域工作, 后者由明轮驱动, 在一些场合动力不足。上述设备体积较大, 适合在大型水域工作, 不便从一个养殖池塘转移至另一个池塘进行作业。河蟹养殖塘由于深度原因^[8]更适合体积小、易于运输的器械设备进行水草收割, 因此开发适用小型机器打捞的驱动系统具有实用价值和意义。

本文结合崇明区新光一队水草实际种植情况以及现场作业的需求, 考虑到梳草船在水草密集的河蟹养殖塘内工作, 无法采用水下螺旋桨推进, 明轮工作时需要搅打水面, 在水草生长旺盛区域

收稿日期: 2023-06-17 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 上海市科技兴农技术创新项目(2022-02-08-00-12-F01096); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目(2021 科技 02-12)

作者简介: 胡庆松(1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: qshu@shou.edu.cn

通信作者: 张铮, E-mail: z-zhang@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)

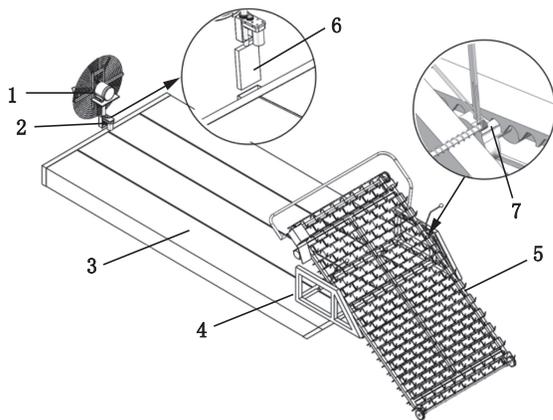
<http://www.shhydx.com>

可能存在动力不足的情况^[9],因此梳草船采用可安装于船面且推力较大的轴流风机驱动。本文开发一种梳草船的推进系统,在阐述总体系统和具体工作原理的基础上,对梳草船进行阻力仿真测试,依据测试结果对轴流风扇进行叶片设计及参数选取后进行试验,验证优化后梳草船总体设计的合理性和设备可靠性在河蟹养殖池塘进行。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

梳草船结构主要由驱动装置、转向装置、平底船体、收草履带、机架和支架等部分组成,如图1所示。船体由4块不锈钢包裹的高密度聚乙烯组成,船体后方安装有用于驱动机构的支架及其固定筐,通过风机实现船体的驱动,使用安装在支架下方舵机的旋转,由齿轮传动使风机左右摇摆实现转向。



1. 驱动装置; 2. 转向装置; 3. 平底船体; 4. 机架; 5. 收草履带; 6. 支架; 7. 挡块。

1. Driving device; 2. Steering device; 3. Flat hull; 4. Rack; 5. Collecting tracks; 6. Bracket; 7. Block.

图1 梳草船整体图

Fig. 1 Overall view of the aquatic plants collecting boat

1.2 工作原理

将所设计驱动装置安装于船体尾部,通过转向舵机的左右摇摆实现船体的前进和转弯。由安装于船首的收草履带电机驱动对水下水草进行收割,驱动与收割可同时进行。梳草船的主要技术参数如表1所示。

2 船体阻力仿真分析

2.1 梳草船模型

风机驱动梳草船在蟹塘中行驶,船体阻力大

小的变化规律是风机驱动系统设计的重要依据。对梳草船船体的阻力计算进行模型构建,梳草船船体由4块被不锈钢包裹的高密度聚乙烯通过前后的钢板包裹固定,船体模型如图2所示。船头向下斜切45°,减少向前航行受到的阻力。实船与船模尺寸比例1:1,以避免尺寸变化引起的误差。

表1 梳草船基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the aquatic plants collecting boat

项目 Item	数值 Numeric value
主体尺寸 Body dimensions	3 600 mm×1 600 mm×800 mm
推进速度 Propulsion speed/(m/s)	1.2
打捞幅宽 Collecting width/mm	1 200
作业深度 Working depth/mm	0~600
打捞速度 Collecting speed/(m/s)	0.8
风机驱动功率 Driving power/kW	1.1
浮体最大吃水 Maximum draft depth/mm	150
割幅 Cutting width/mm	1 200
梳草功率 Plants collecting power/kW	0.5

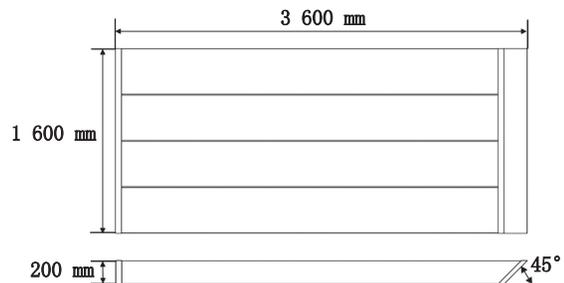


图2 梳草船模型

Fig. 2 Aquatic plant collecting boat hull model

2.2 数学模型和网格划分

使用CFD仿真软件利用流体计算模型对梳草船阻力进行计算。在收割过程中梳草船会被履带收割的力向前拉动,在行驶到指定区域以及运输水草的过程中,履带则是收起状态,因此仿真模型为梳草船船体。在河蟹养殖塘内不需要过高的速度,为了适应上述2种不同情况下的速度需求,设计船速即入口速度0.4~1.2 m/s,设计最大负载650 kg,船体空载吃水深度0.03 m,半载吃水深度0.09 m,满载吃水深度0.15 m。在航速为0.4~1.2 m/s时测量所受阻力并验证计算模型的有效性^[10],该船的主尺度如图2所示。整个计算域尺度以船头延伸1倍船长,沿船尾延伸1倍船

长,上边界距离船面4倍船高,下边界距离船底4倍船高,侧边界距离船舷1倍船宽,建立一个长10 800 mm、宽4 800 mm、高2 000 mm的长方体控制域。在流入口上半部分设定为空气,下半部分设定为水,入口边界给定船体航行速度1.2 m/s,流域两侧设为对称边界,出口处设为压力出口^[11]。边界条件设置如图3所示。

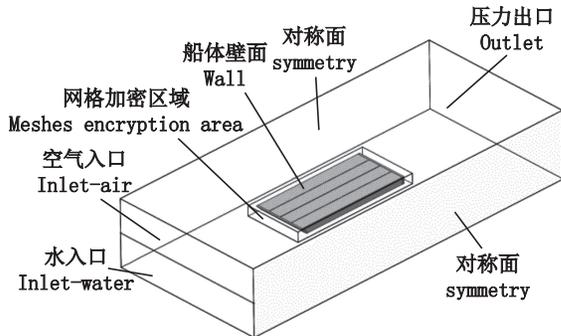


图3 计算域和边界条件

Fig. 3 Calculation domain and boundary conditions

整个CFD数学模型的流场控制方程由连续方程和运动方程构成。采用K-Epsilon-Reliezable模型^[12]作为整个流场的湍流模型,遵守动能守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p 为微元体上压力; τ 为黏性作用产生的作用于微元表面上的黏性应力; F 为微元体上体力;若仅有重力,并且 z 轴数值向上,则:

$$F_x = F_y = 0, F_z = -\rho g \quad (2)$$

式中: ρ 为当前流体密度; g 为重力加速度。

不可压缩黏性流体采用平均雷诺方程对压力场和速度场进行耦合。仿真求解选择非稳态,因存在自由液面,所以选定VOF多相流模型^[13]进行计算:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial(u_i a_q)}{\partial x_i} = 0, (q = 1, 2) \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 分别为空气相、水相的体积分。

该方程用于追踪自由面的波动,工作环境为水和空气,空气和水的入口设定为速度入口,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。

梳草船在河蟹养殖塘内运行状态可分为空船(吃水深度0.03 m)、半载(吃水深度0.09 m)和满载(吃水深度0.15 m)等3种工作状态。需要分析船体在3种状态下的阻力影响,分别将液位设定为0.03、0.09和0.15 m,入口速度设定为0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 m/s。采用切割体网格技术划分计算域,网格划分如图4所示。图4为对船体附近网格加密划分,以准确捕捉船体周围的流场。

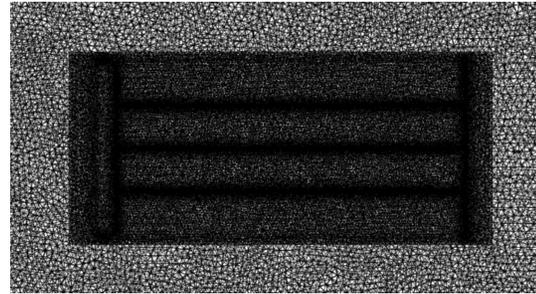


图4 计算域网格剖面图

Fig. 4 Profile of computational domain meshes

2.3 网格无关性验证

在此区块划分基础上进行网格无关性验证,在航速1.2 m/s基础上选取低密度、中等密度、高密度等3种网格尺寸进行数值计算并分析网格尺寸对梳草船空载行驶阻力模拟计算收敛性的影响,结果如表2所示。计算结果误差随网格数量增加而减小,中网格与细网格的阻值计算相差约1.7%,误差较小,但计算时间相差较大,因此后续计算的网格尺寸选取中网格。

表2 网格验证
Tab. 2 Mesh validation

类型 Type of meshes	单元数量 Number of meshes	阻力数值 Resistance calculation results/N
低密度网格 Coarse mesh	250 373	27.933 68
中密度网格 Mid mesh	570 842	27.646 71
高密度网格 Fine mesh	1 082 772	27.188 24

2.4 船体阻值分析

基于上文网格验证结果,分析液位设定为0.03、0.09和0.15 m,入口速度设定为0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 m/s情况下阻值如图5所示。当船体的推力满足空载的最大阻力27.64 N时,可以满足吃水0.09 m的最大速度0.8 m/s,吃水0.15 m的

0.6 m/s;当船体推力满足半载的最大阻力 61.89 N 时,可以满足满载的 1.0 m/s;当船体推力满足满载的最大阻力 94.91 N 时,仅可在 61.89 N 的基础上多满足一个吃水 0.15 m 航速 1.2 m/s 的设计航速,而总推力需要提高 53.35%,过高的阻值会加快梳草船耗电量,降低续航时间。为满足梳草船能够适应河蟹养殖塘内收割的动力需求,且在水草收割完毕后无须过大的速度靠近岸边,因此分析梳草船所需的推力经仿真计算得在 61.89 N 附近时可以满足实际工况,船体所需的最大推进力应大于 61.89 N。

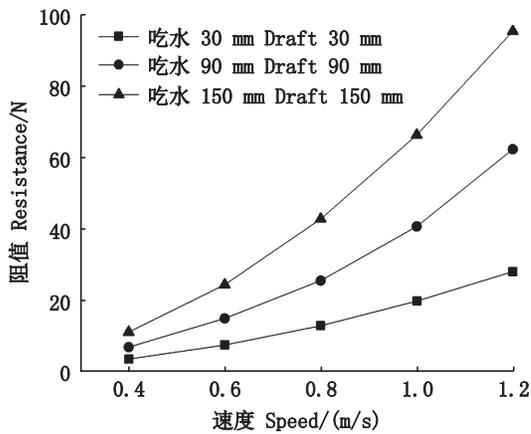


图5 阻力仿真结果

Fig. 5 Result of resistance simulation

3 风机优化及选型

风机叶根安装角对于叶片的气动性能影响较大,轴流叶轮的叶片角度越大,轴流式风机的出口风量越大,持续增大时,出口全压也相应地降低,电机功率下降,全压效率提高^[14]。优化叶根安装角可获得最佳推力与续航时间组合。为进一步研究叶根安装角对风机推力的影响,利用 CFD 仿真,对不同的安装角进行仿真计算,为风机驱动工作提供可靠数据支撑。

3.1 风机叶片建模

利用三维建模软件对三叶轴流风扇扇叶进行建模,如图 6 所示为最小叶根安装角度的轴流风扇,所建立的风扇叶根安装角度分别为 25°~31° 共 7 个,风扇叶片数均为 3 片,扇叶底部宽度为 85 mm,顶部宽度为 100 mm,叶轮直径为 600 mm。

3.2 数学模型和网格划分

整个计算域尺度以圆柱体为外流域(图 7),模拟风扇周围的流场分布,在风扇周围建立小圆

柱体作为内流域表示风扇的旋转域,转速设定为 2 000 r/min,依次向下减少 300 转直至 800 转作为最小驱动挡位。

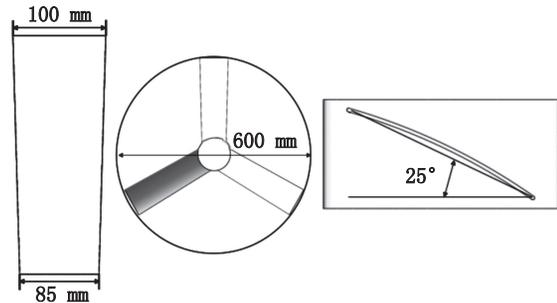


图6 风扇模型

Fig. 6 Fan model

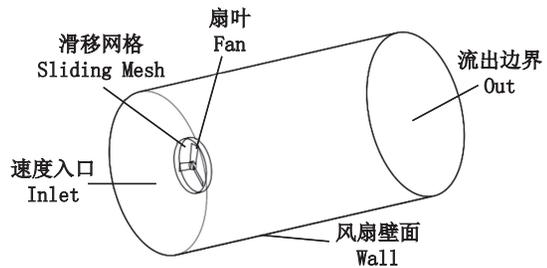


图7 风扇计算域和边界条件

Fig. 7 Fans calculation domain and boundary conditions

网格采用分块划分,设置了圆筒状的静外流场以及网格加密的滑移网格,具体网格如图 8 所示,这种方法可以有效减少网格数量,提高运算速度。

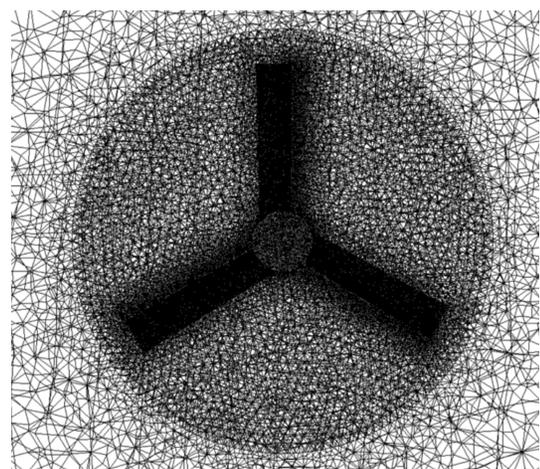


图8 计算域网格剖面

Fig. 8 Profile of computational domain meshes

湍流模型选取 Kepsilon-Relizable, 因其对于旋转均匀剪切流具有较好的验证性^[15-16],设定入口为速度入口,初始速度为 0,设定出口边界条件为

流出边界,设定扇叶的加密网格区域为滑移网格,旋转轴设定为垂直于扇叶方向。设定时间步长为0.01,总步数为1 000,每个时间步的迭代数为20。风扇仿真速度流场如图9所示。

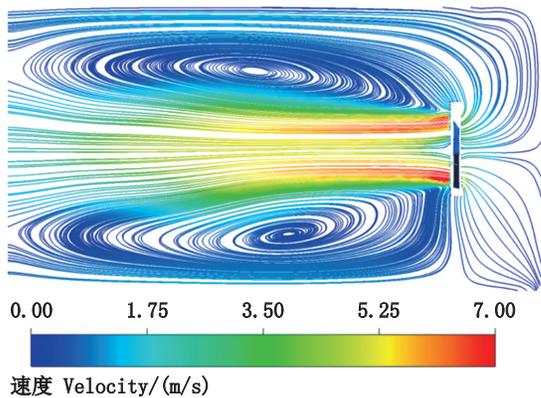


图9 风扇仿真速度流场图

Fig. 9 Speed flow field diagram of fan simulation

3.3 计算结果分析

分别对25°~31°叶根安装角的风扇进行仿真运算,研究同等转速下不同叶片安装角度对推力的影响。据图10可以看出,由25°至26°整体推力增长率为8.32%,由26°至27°整体推力增长率为8.19%,由27°至28°整体推力增长率为6.45%,由28°至29°整体推力增长率为1.96%,由29°至30°整体推力增长率为2.62%,由30°至31°整体推力增长率为2.36%。对比不同叶片安装角的风扇性能可知:叶根安装角度越大,推力越大;在相同转速下,叶根安装角为28°时,推力为67.68 N。叶根安装角度继续增大,输出推力增长率显著降低,且在有限的增长下结合阻力对整体速度提升较小。

3.4 模型数据验证

在试验验证阶段轴流风机转速为800~2 000 r/min时速度与推力的测试。

$$N = (Q/3\ 600) \cdot P / (1\ 000 \cdot \eta) \cdot K \quad (4)$$

式中: Q 为风量, m^3/h ; P 为全压, Pa ; N 为功率, kW ; η 为风机全压效率,通常为0.6; K 为电机容量系数,轴流风机通常采用1.05。

通过计算得到应采用额定功率为1.02 kW的电机进行试验,向上取整选择1.1 kW。图11为方案中28°安装角度的转速与推力的实测结果。可得风扇推力随着转速的增加而上升,通过实测结果得到与仿真结果平均相差13.29%,实测时受风和电机转速不稳定等因素的影响,实测结果与仿

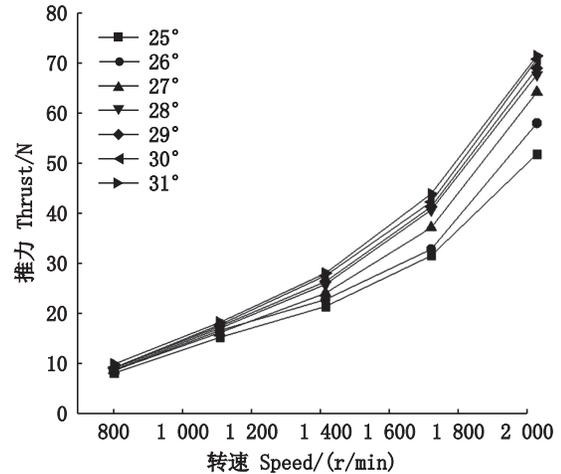


图10 7种叶根角度扇叶在不同转速下的推力

Fig. 10 7 different blade root angles fan blades thrust at different speed

真结果平均仅相差13.29%,风机仿真结果可信度高。

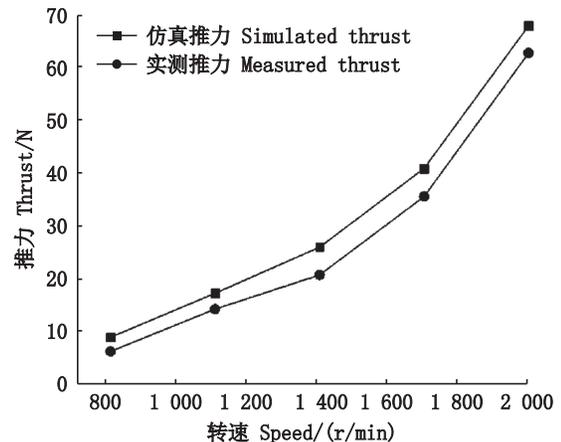


图11 计算值与实验值对比

Fig. 11 Comparison between simulation and testing values

4 转向系统设计

梳草船通过尾部风机的左右摇摆实现船体的转向,如图12所示,梳草船尾部有一支架底座,可将设计的支架直接插入安装,长方形的底座确保驱动系统在转向时不会左右摇摆,限制了垂直向上移动以外的5个自由度。

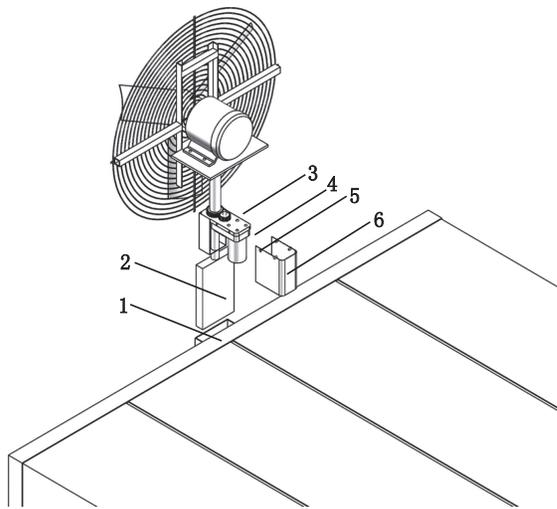
齿轮传动是一种重要的机械传动形式,在驱动过程中,梳草船的转向主要通过梳草船船尾的风机旋转来调整控制,在平台正面布置齿轮传动驱动风扇转动,为防止齿轮磨损集中在个别齿上,通过中心距选择模数适中,齿数互为质数的

齿轮。

$$D = (Z_1 + Z_2)/2 \quad (5)$$

式中： D 为中心距； Z_1 和 Z_2 为两个齿轮的齿数； M 为模数。

选择模数为1.5 m，齿数分别为19和29作为传动齿轮，两传动齿轮安装位置如图13所示。选用转动角度为 270° ，在24 V工作电压下扭矩为180 kg/cm的舵机，经过一级齿轮传动得到最大单边转动角度 88.81° ，带自锁功能，回到起始位置后不会轻易左右摇摆，满足河蟹养殖塘内的梳草船转向需求。



1. 支架底座；2. 支架；3. 传动齿轮；4. 舵机平台；5. 舵机；6. 防水后盖。

1. Frame base; 2. Frame; 3. Transmission gear; 4. Steering motor platform; 5. Steering motor; 6. Waterproof back cover.

图12 驱动及转向系统安装示意图

Fig. 12 Driving and steering mechanism installation diagram

5 试验结果与分析

对该驱动系统进行性能试验(图14)，地址选取以伊乐藻为主的崇明区新光一队河蟹养殖塘，在无水草、轻度水草(水草顶端距离水面 >3 cm且 <8 cm)、重度水草(水草顶端距离水面 ≤ 3 cm)情况下吃水深度0.03和0.15 m下的运行速度和以船体质心为中心的转弯半径，以及使用该动力系统在单位时间内割水草的质量进行记录得到以下结果：由表3可知，在无水草区域行驶情况下空载和满载船速分别为1.14和0.43 m/s；在轻度水草(水草顶端距离水面 >3 cm且 <8 cm)区域行驶情况下空载和满载的最大船速分别为1.06和0.47 m/s；在密集

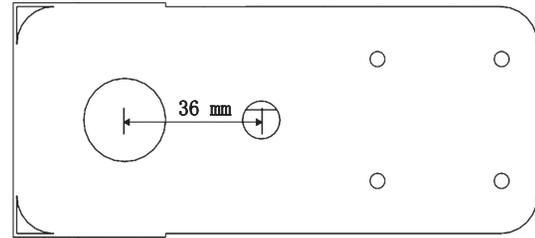


图13 舵机与风机中心距

Fig. 13 The center distance between steering motor and fan

水草(水草顶端距离水面 ≤ 3 cm)区域行驶情况下空载和满载的最大船速分别为0.63和0.44 m/s，转弯半径1.2 m，使用48 V/24 Ah电池能连续运转1.5 h。上述试验数据表明梳草船动力系统满足空船设计最大船速0.4~1.2 m/s的动力设计，能在水草密集区域行驶，适应河蟹养殖塘的使用需求。

表3 不同水草情况下船速

Tab. 3 Boat speed under different aquatic plants

水草情况 Aquatic plants situation	空载船速 No-load speed/(m/s)	半载船速 Half-load speed/(m/s)	满载船速 Full-load speed/(m/s)
无 None	1.14	0.85	0.43
轻度 Mild	1.06	0.69	0.47
密集 Dense	0.63	0.57	0.44

使用该驱动系统的梳草船，对3次单人人工割草时间以及称重结果进行统计对比，得到平均每小时人工收割水草483 kg。对使用该风力驱动的梳草船进行12次收割水草的时间以及称重结果进行统计，得到单人平均每小时收割水草938.5 kg，即单位时间内与人工水草清理重量相比提高94.3%(表4和表5)。

6 总结

针对蟹塘梳草船的驱动和转向问题，对梳草船进行了船速0.4~1.2 m/s，吃水深度0.03~0.15 m进行阻值计算仿真，得到梳草船所需最大推力为61.89 N后，对一种三叶风机由 25° ~ 31° 叶根安装角对推力的关系进行仿真，得到最佳叶根安装角。设计了位于梳草船船尾的驱动转向系统安装架，并在河蟹养殖塘进行实地试验，得出以下结论。

(1)通过对梳草船船体阻力的仿真分析，得到了在船速0.4~1.2 m/s，吃水深度0.03~0.15 m时的阻力曲线，分析得出梳草船所需最小推力应大于61.89 N，当推力继续增大对梳草船的工作速度提升不大。



图 14 梳草船测速现场
Fig. 14 Site of the comb-collect boat speed measurement

表 4 双人使用梳草船的收集效率
Tab. 4 Collecting efficiency of two-person manipulating boat

序号 Number	收割集时间 Time/min	称重结果 Weight/kg	收集效率 Efficiency/(kg/h)
1	23.2	820	2 114.6
2	18.7	567	1 816.0
3	21.5	532	1 482.3
4	7.7	296	2 296.5
5	17.1	590	2 070.1
6	14.2	371	1 567.6
7	31.6	786	1 492.4
8	1.7	71.2	2 565.0
9	3.8	105	1 643.4
10	2.9	95.3	1 961.4
11	2.5	84.4	2 026.8
12	19.4	484.6	1 496.3
平均值 Average	19.4	400.2	1 877.3

表 5 单人人工割草效率
Tab. 5 Efficiency of cutting by single person

序号 Number	收割集时间 Time/min	称重结果 Weight/kg	收集效率 Efficiency/(kg/h)
1	27.0	211.5	470.1
2	27.9	247.3	532.0
3	39.6	295.5	447.2
平均值 Average	31.5	251.5	483.1

(2)对三叶轴流风扇扇叶的叶根安装角度进行优化,得到输出推力从 28° 增长率较高,为 6.45%,之后显著下降,有限的增长下,结合阻力对整体速度提升较小。通过实物试验得到与仿真结果相差 13.29%,可信度高。

(3)试验表明,使用该梳草船作业速度最大为 1.14 m/s,满载情况下在水草密集区域速度为 0.38 m/s,转弯半径 1.2 m,在河蟹养殖塘水面具有较好的行驶性能,对比单人人工作割水草效率提

升 94.3%。

梳草船在基于 CFD 软件的模拟计算下能较为准确地观察到船体的阻值变化,对梳草船的动力研究具有一定的运用价值,当前设计的驱动转向系统可以满足河蟹养殖塘的使用,为自动化水草收集打下了较好的基础。

参考文献:

[1] 周文全, 陈文彬, 浦竞文, 等. 3 种水草搭配模式对河蟹生长及水环境的影响[J]. 水产科技情报, 2022, 49 (3): 127-131.
ZHOU W Q, CHEN W B, PU J W, et al. Estimation on growth performance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* and water qualities under three different combination modes of aquatic plants [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2022, 49 (3) : 127-131.

[2] 刘宇, 马旭洲, 戴丹超. 伊乐藻管理对河蟹精养池藻类水华的防控作用[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(6) : 73-80.
LIU Y, MA X Z, DAI D C. Algal bloom prevention and control in intensive culture ponds of *Eriocheir sinensis* by management of *Elodea nuttallii* planting [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(6): 73-80.

[3] ZEHNSDORF A, HUSSNER A, EISMANN F, et al. Management options of invasive *Elodea nuttallii* and *Elodea canadensis*[J]. Limnologica, 2015, 51: 110-117.

[4] 李旭英, 尚士友, 杜建民, 等. 9GSCC-1.4H 型沉水植物收割机船队的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1) : 59-62.
LI X Y, SHANG S Y, DU J M, et al. Design on 9GSCC-1.4H type submerged plants harvesting boat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 59-62.

[5] CUTHBERT R N, RANE K, DICK J T A, et al. Die Hard: impact of aquatic disinfectants on the survival and viability of invasive *Elodea nuttallii*[J]. Aquatic Botany, 2019, 154: 11-17.

- [6] 王向春. 小型水草收割机设计[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
WANG X C. Design of a small aquatic cutting machine [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [7] 李俊, 张丽珍. 基于人机工程学的水草收割机操纵器设计[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 21-22.
LI J, ZHANG L Z. Design of the aquatic weed harvester manipulators based on ergonomics [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(2): 21-22.
- [8] 王琢, 张俊峰, 肖进, 等. 虾蟹池塘水草清理机械研究进展[J]. 中南农业科技, 2022, 43(6): 185-188.
WANG Z, ZHANG J F, XIAO J, et al. Research progress on cleaning machinery of water weeds in shrimp and crab pond [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2022, 43(6): 185-188.
- [9] 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.
- [10] 李俊, 朱逸凡, 陈雷雷, 等. 蟹塘双体投饵船行驶阻力分析及船型优化[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 269-277.
LI J, ZHU Y F, CHEN L L, et al. Analysis of driving resistance and optimization of boat type for crab pond catamaran bait boat [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 269-277.
- [11] 熊一超, 袁成清. 基于Fluent的船体界面阻力分析[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5): 35-38.
XIONG Y C, YUAN C Q. Study of hull interface resistance based on FLUENT [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(5): 35-38.
- [12] 王英第, 陈彦臻, 周伟健, 等. 船体阻力数值预报研究及黏性流场计算[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 17-22.
WANG Y D, CHEN Y Z, ZHOU W J, et al. Research on resistance prediction and calculation of viscous flow field [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(1): 17-22.
- [13] 倪崇本. 基于CFD的船舶阻力性能综合研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
NI C B. A comprehensive investigation of ship resistance prediction based on CFD theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [14] 褚双磊, 李宏伟. 不同轴流叶轮角度的轴流式灭火风机气动性能试验与数值模拟研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 106-111.
CHU S L, LI H W. Aerodynamic performance experiment and numerical simulation study of the axial-flow fire-fighting fan about different blade angle [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 106-111.
- [15] 于晓丽, 王树杰, 袁鹏, 等. 两种湍流模型在潮流能水轮机数值模拟中的适用性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 114-120.
YU X L, WANG S J, YUAN P, et al. The study on the applicability of two turbulence models in the tidal turbine [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2): 114-120.
- [16] KIM Y I, LEE S G, LEE S Y, et al. Investigation on unstable pressure distribution of an axial fan blade with difference of setting angle and chord length: original papers [J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2020, 13(2): 336-347.

Design and test of aquatic plants comb-collect boat driving system

HU Qingsong¹, HUANG Kecheng¹, WU Gang², GAO Jiabao³, ZHANG Zheng¹

(1. College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Changzhou Huaxi Fishery Co., Ltd., Changzhou 213300, Jiangsu, China; 3. Bright Food Group Shanghai Chongming Farm Co., Ltd., Shanghai 202179, China)

Abstract: Aquatic weed management is an important part of crab aquaculture. In order to reduce the labor intensity of aquatic weed collection equipment control and decrease the use of personnel, the fan driving system of the aquatic plants comb-collect boat has been developed. The driving system is mainly composed of fan blades, protective devices, brackets, motors, reduction drives and waterproof sealing covers. Through CFD fluid simulation to calculate and verify the resistance of the practical boat, the fan was selected, the rated power is 1 100 W, the working voltage was 48 V, the maximum width of the blade was 100 mm, the inclination angle of the blade root was 28°, and the steering system with self-locking function was designed. The tests of using the drive system in the crab breeding pond showed that the continuous working time was 1.5 hours under the 48 V/24 Ah power battery, and the unloaded and fully loaded boat speeds were 1.14 and 0.43 m/s respectively in the absence of anhydrous weeds. The maximum speed of unloaded and fully loaded boats was 1.06 and 0.26 m/s respectively under the condition of mild aquatic weeds (the top of aquatic plants was >3 cm and <8 cm from the water surface). The maximum boat speeds of unloaded and fully loaded boats under severe aquatic plants (the top of aquatic plants was ≤3 cm from the water surface) were 0.71 and 0.12 m/s, respectively, and they could maintain a forward posture and continue to collect aquatic plants. The average turning radius was 1.2 meters. The on-site application showed that the driving system meets the dynamical requirements of the combing boat in the actual aquatic weed environment of the crab pond, and the weight of the aquatic weed increased by 94.3% per unit time compared with the manual cleaning of the aquatic weed, laying the foundation for the realization of automatic aquatic weed management.

Key words: crab pond; aquatic plants; comb-collect boat; fan driving; leaf root inclination angle