doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.014

内导叶滚筒式收鱼机设计与实验

闫国琦　刘婷婷　莫嘉嗣　倪小辉
（华南农业大学工程学院，广州 510642）

摘要：针对深海域网箱养殖人工收鱼效率低、且劳动强度大，吸鱼泵等传统收鱼装置鱼损率高、需要装备大功率发电系统、不适合中小型收鱼船作业等问题设计了内导叶滚筒式收鱼机。对该装置的主体结构进行仿真，确定了主体结构发生最大等效应力和应力集中的位置，根据仿真结果进一步优化结构，并试制了实验装置。通过实验得出最优控制方案，即在倾角 10°、转速 15.3 r/min 情况下，有效输送量与功耗比最优，且滚筒在不同倾角下最优转速为 15 r/min，实验鱼损率为 0.1%，满足用户要求。该装置能在保证一定收鱼效率的同时降低鱼损率，适合中小型渔船收鱼作业。

关键词：海洋网箱养殖；内导叶滚筒式收鱼机；仿真；实验
中图分类号：S972　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)11-0129-07

Design and Experiment of Internal Guide Vane Drum Machine for Fishing

YAN Guoqi　LIU Tingting　MO Jiasi　NI Xiaohui
(*College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: In deep sea area, fishing in large cage aquaculture is low efficiency and high labor intensity, and the fish injure rate of fishing appliances such as fish pump is high, so it needs to be equipped with high-power generation system, which is not suitable for small and medium sized fishing boats. An internal guide vane drum machine was designed for fishing which had lower power consumption by the screw conveying principles. And there was no such appliance in marine aquaculture. According to the structure simulation, the relationship between deformation, equivalent stress, speed and dip angle was got, as well as the position where had the maximum equivalent stress between the drum's surface helical vane and drum's inner wall was located. As the simulation shown, stress concentration occurred in support shell of binding force in bearing. The experimental setup was designed and optimized according to the simulation results. When the length of the drum was certain, the potential energy of transported fish was related to different dip angle. The transmission rate to fish potential energy was defined as the appliance effective transmission. A special formula can be used to be the criterion of optimizing the control scheme. The numerator of this formula was an interpolation equation of effective transmission rate at different speeds. The denominator of this formula was an interpolation equation of power consumption at different speeds. The reliability, power consumption and fish injure rate experiments were conducted. The results demonstrated that there was an optimal control scheme under certain constraints, it was the drum with parameters of 10° dip angle and 15.3 r/min speed. Moreover, the optimized rotating speed of the drum was 15 r/min under different dips. The experimental results showed a lower fish injure rate of 0.1%, which improved the quality of fishing.

Key words: marine cage aquaculture; internal guide vane drum machine for fishing; simulation; experiment

收稿日期：2019-04-17　修回日期：2019-05-15
基金项目：精准对接扶贫脱贫农渔业机械化科技成果推广与示范项目（粤科函社农字[2018]2136 号）和广东省教育厅青年人才类项目（2018KQNCX021）
作者简介：闫国琦（1978—），男，副教授，博士，主要从事海洋养殖装备研究，E-mail：ygq1978@scau.edu.cn
通信作者：莫嘉嗣（1987—），男，讲师，博士，主要从事海洋养殖装备研究，E-mail：mo_jiasi@scsu.edu.cn

0 引言

高密度水产养殖加剧了我国近海和陆地水域的环境污染,导致水质下降和水产品质量下降[1-4]。为了减轻近海养殖压力、提高海洋水产资源可持续利用水平和水产养殖品质,海洋养殖业须向深海域发展。文献[5-8]提出的相关国家政策对我国乃至其他国家海洋养殖业的可持续发展具有指导性意义。海洋网箱养殖过程中,收鱼作业是劳动强度最大的环节之一,大型海洋养殖企业或渔民普遍采用吸鱼泵实现自动收鱼作业,其效率较高,但功率需求较高,需要配置在大型作业船上使用[9]。小型水产养殖企业和中小型渔船受条件所限,目前主要采用人工或自动化程度低的收鱼装置,因此需要一种适合在中小型渔船上使用、且功率小的自动收鱼装置。基于以上背景,本文设计一种低功耗的滚筒式收鱼装置,通过内导叶旋转将网箱中集中后的鱼提升至渔船船舱高度,提升过程中将水排出,降低驱动功耗和鱼损率,通过仿真和实验分析,得到有效输送量与功耗比的最优控制方案,以设计出中小型渔船适宜的收鱼自动装备。

1 结构与工作原理

螺旋内导叶滚筒式收鱼机的结构如图 1 所示[10-13],由滚筒、螺旋叶片、三角胶带、胶带轮、电机、变频器、轴承、活动侧板与支撑结构组成。其中螺旋叶片外侧与滚筒固定连接组成主体结构,当滚筒单向滚动时,鱼从滚筒下端入口进入,被联动的螺旋叶片向上端出口推动。三角带与带轮将电机动力传递并带动滚筒转动。变频器用于调节电机输出的转速,多个轴承用于固定和限制滚筒的位置,活动侧板用于调节滚筒的倾角,支撑结构用于支撑和固定整套装置。

在收鱼环节中,将鱼集中在网箱内一个较小的空间,形成高密度区域,收鱼机安装在收鱼船上,上端与鱼箱位置匹配,下端置于网箱高密度区域。当滚筒开始转动时,鱼在螺旋叶片法向推力的作用下有轴向转动的趋势,但受自身重力和摩擦力的约束使得鱼没有产生轴向转动,而是在叶片法向推力的轴向分力作用下,沿输送槽轴向移动。最终鱼群从装置下端传送到装置上端,输送到贮鱼箱内。

2 关键环节设计

为了便于观察实验过程以及鱼的输送状态,本收鱼机实验装置选用透明的亚克力材质。根据实际需求,选用滚筒长度 L 为 2 000 mm、壁厚为 5 mm;螺旋叶片外径 D 为 500 mm、内径 d 为 200 mm、螺距 P 为 200 mm、厚度为 2 mm。

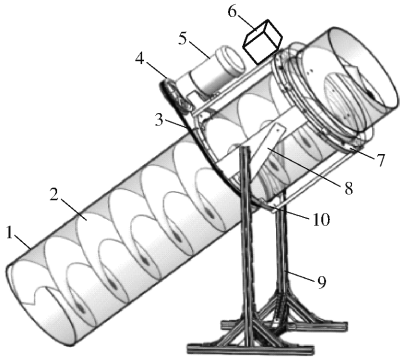

图 1 内导叶滚筒式收鱼机结构示意图

Fig. 1 Structure of internal guide vane screw drum machine for fishing

1. 滚筒 2. 螺旋叶片 3. 三角胶带 4. 胶带轮 5. 电机 6. 变频器 7、10. 轴承 8. 活动侧板 9. 支撑结构

2.1 螺旋升角

螺旋叶片上任一点的法线与旋转轴线的夹角称为该点的螺旋升角 φ,其计算公式为[14-18]

$$\varphi = \arctan \frac{P}{\pi D_i} \tag{1}$$

式中 D_i——螺旋叶片某点的直径,mm

由式(1)可知,螺旋叶片的螺旋升角是一个变化的值,由于 $D > d$,所以 $\varphi_1 > \varphi_2$,其中 φ_1 和 φ_2 表示内径和外径处的螺旋升角,公式为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{P}{\pi d} \approx 17.7° \tag{2}$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{P}{\pi D} \approx 7.3° \tag{3}$$

2.2 滚筒倾角

滚筒的倾角取决于船体与网箱作业面的距离和高度差,会影响装置的功耗[19-21]。水平螺旋输送机的倾角为 0°,其输送率最高,功耗最小;垂直螺旋输送机的倾角为 90°,其输送率最低,功耗最大。本文实验设计的装置滚筒设置为倾斜,倾角在 0°~90°之间,适当降低倾角可以提高输送率和降低功耗。

2.3 驱动系统与传动装置

驱动系统由电机、变频器、胶带轮与胶带组成[22-25]。为满足实验顺利进行与装置正常运转,选用功率为 550 W 的单相异步减速电机,其减速前的转速为 1 360 r/min,减速比为 40,减速后输出转速为 34 r/min。根据估算,本文实验选用 750 W、220 V 单相输入单相输出的变频器来调节电机输出轴转速。

传动装置如图 2 所示,由轴承、支撑结构与活动侧板等组成[26-27]。轴承由电机座板、竖直圆环板与水平圆环板连接固定,轴承圆周面上对称安装带螺

纹的包胶轴承与带螺杆的万向球。支撑结构由铝型材通过角码、角件连接固定。调节活动侧板与不同活动卡销孔连接，实现轴承与滚筒的不同倾角。

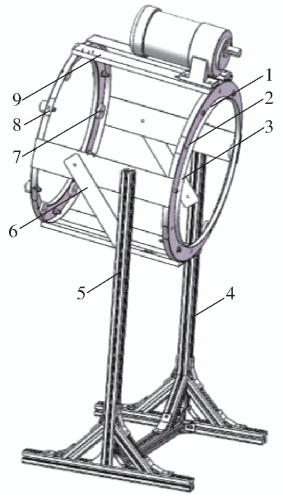

图 2　传动装置

Fig. 2　Transmission appliance

1. 轴承　2. 水平圆环板　3. 竖直圆环板　4. 支撑结构　5. 活动卡销　6. 活动侧板　7. 带螺纹的包胶轴承　8. 带螺杆的万向球　9. 电机座板

3　滚筒有限元仿真

3.1　建模

本文实验装置采用 Solidworks 软件建立滚筒三维模型。装置输送鱼时，鱼和水集中在滚筒底部，对滚筒和螺旋叶片产生作用力，将三维模型导入 ANSYS DesignModeler 中，在鱼和水产生作用力的部位建立 Imprint Faces，便于施加载荷。轴承支撑滚筒部位建立 Imprint Faces，便于施加约束，且滚筒后端的圆环挡板对滚筒有约束作用。胶带对滚筒有转矩作用，在接触部位建立 Imprint Faces，便于施加载荷。

滚筒网格划分选择实体单元，在螺旋叶片曲率较大处加密网格，采用自动网格划分（图 3），节点数是 52 121 个，单元数是 25 063 个。

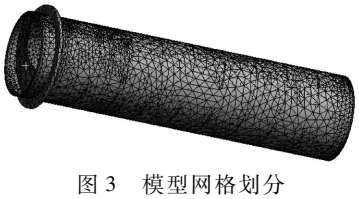

图 3　模型网格划分

Fig. 3　Model of grid generation

3.2　约束与载荷

圆环挡板限制滚筒轴向移动，且圆环挡板面与万向球接触，可以看作是无摩擦接触。建立局部坐标系，坐标系的 Z 轴垂直于圆环挡板面，在圆环挡板面分别施加位移约束 A 与无摩擦约束 B，Z 轴方向自由，X 轴与 Y 轴方向固定约束；在轴承支撑滚筒的部位施加圆柱面约束 C、D，切向自由，轴向和径向约束。

滚筒承受的载荷比较复杂，滚筒自身重力以载荷 E（Standard earth gravity）的形式施加于滚筒；鱼和水重力以载荷 G、H（Force）的形式施加于滚筒内壁与螺旋叶片；胶带的转矩换算成力载荷 I（Force）的形式施加于滚筒；滚筒的转动以载荷 F（Rotatioanal velocity）的形式施加于滚筒。约束与载荷施加如图 4 所示。

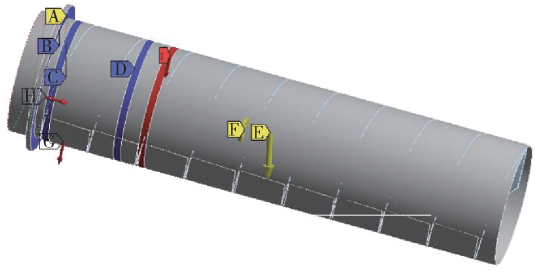

图 4　施加约束与载荷

Fig. 4　Restriction and load

3.3　仿真

输送鱼时滚筒一方面受自身重力作用，以重力加速度施加载荷；另一面承受鱼和水的重力，以力载荷的形式施加在滚筒上，滚筒的转速以旋转速度的形式施加载荷。

滚筒材质设置为塑料，倾角设置为 10°。当滚筒转速为 80 r/min 时，仿真结果如图 5、6 所示。可以看出，最大变形量发生在滚筒下端，最大值为 1.814 9 mm；最大等效应力发生在滚筒与轴承的接触位置，最大值为 0.669 42 MPa，同时在轴承支撑滚筒的位置出现了应力集中。

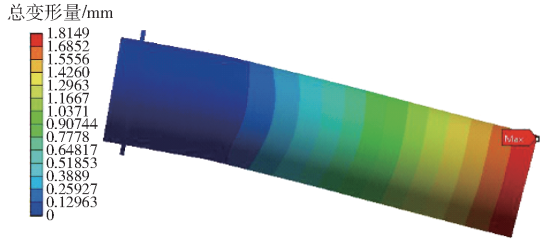

图 5　转速 80 r/min 时总变形量

Fig. 5　Total deformation at speed of 80 r/min

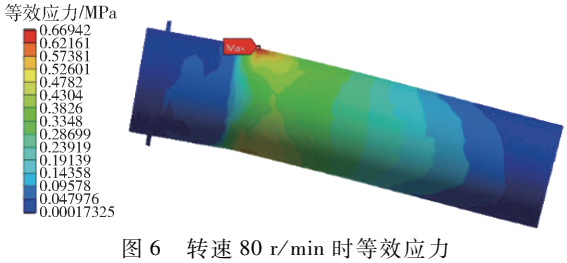

图 6　转速 80 r/min 时等效应力

Fig. 6　Equivalent stress at speed of 80 r/min

滚筒在不同转速时总变形量与等效应力的变化趋势相同，滚筒转速在 30、40、50、60、70、80 r/min 时

的仿真结果如表 1 所示。最大变形量发生在滚筒下端,随转速增加而增大;最大等效应力发生在滚筒与轴承的接触位置,随转速增加而增大,同时在轴承支撑滚筒位置出现了应力集中。在轴承支撑滚筒的位置进行加固处理,减小等效应力。

表 1 不同转速下仿真结果

Tab. 1 Simulation results at different speeds

转速/(r·min^{-1})	最大变形量/mm	等效应变	最大等效应力/MPa
30	1.813 2	0.000 669 98	0.668 80
40	1.813 4	0.000 670 19	0.668 88
50	1.813 7	0.000 670 46	0.668 98
60	1.814 0	0.000 670 80	0.669 10
70	1.814 4	0.000 671 20	0.669 25
80	1.814 9	0.000 671 65	0.669 42

滚筒材质设置为塑料,转速为 30 r/min,当滚筒倾角为 35°时,仿真结果如图 7、8 所示。最大变形量发生在滚筒下端,最大值为 0.883 92 mm;最大等效应力发生在滚筒前端螺旋叶片与滚筒内壁的接触位置,最大值为 0.762 79 MPa,同时在轴承支滚筒的位置出现了应力集中。

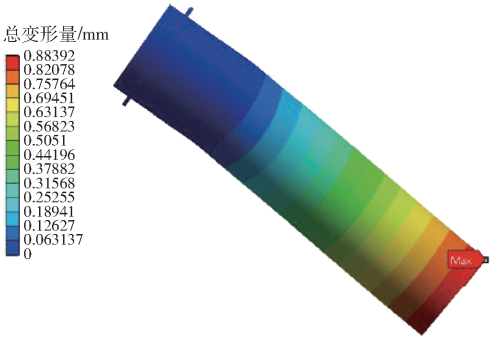

图 7 倾角 35°时总变形量

Fig. 7 Total deformation at dip angle of 35°

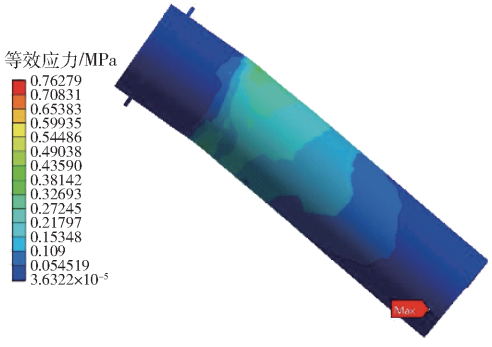

图 8 倾角 35°时等效应力

Fig. 8 Equivalent stress at dip angle of 35°

滚筒在倾角 10°、15°、20°、25°、30°、35°时的仿真结果如表 2 所示。最大变形量发生在滚筒下端,随倾角增加而减小;最大等效应力发生在滚筒前端螺旋叶片与滚筒内壁的接触位置,随倾角增加先增加后减小,同时在轴承支撑滚筒的位置出现了应力集中。在滚筒下端螺旋叶片与滚筒内壁接触位置进行加固处理,减小等效应力。

表 2 不同倾角时仿真结果

Tab. 2 Simulation results at different dip angles

倾角/(°)	最大变形量/mm	等效应变	最大等效应力/MPa
10	1.813 2	0.000 669 80	0.668 80
15	1.613 7	0.000 947 82	0.903 51
20	1.396 1	0.000 912 78	0.862 73
25	1.280 8	0.000 885 82	0.825 71
30	1.026 7	0.000 846 83	0.784 70
35	0.883 9	0.000 724 16	0.762 79

4 现场实验

根据仿真结果,优化实验装置设计方案,以在相应位置增加加强筋板的方式加强滚筒的结构强度。优化后实验装置如图 9 所示,实验现场见图 10。

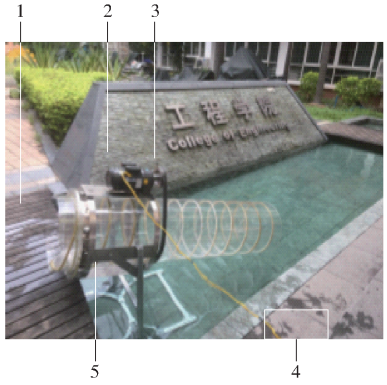

图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental device

1. 滚筒 2. 电机 3. 胶带 4. 变频器 5. 支撑结构

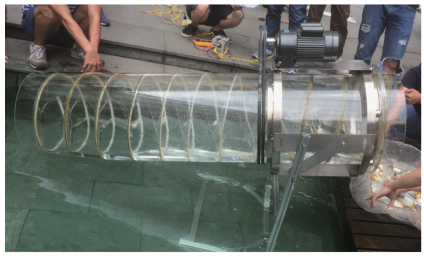

图 10 实验现场

Fig. 10 Experimental field

4.1 实验方案

为了验证收鱼机连续工作可靠性,将收鱼机连续空载运行,实验过程中实时检查收鱼机是否故障,空载实验结束后检查运动零部件损耗情况;并测得收鱼机空载功耗。收鱼实验过程中仪器自动记录收鱼机输送金鲳鱼的总功耗和实时功率,由总功耗与空载功耗推算收鱼机实际作业功耗。为了统计收鱼机输送鱼时的鱼损率,实验前检查金鲳鱼体表两侧面,剔除侧面损坏的鱼,实验后统计表面损坏的金鲳

鱼数量，并计算鱼损率，其中鱼损率是金鲳鱼体损坏的数量占实验总数的百分比。

实验选用金鲳鱼总质量 20 kg，单条金鲳鱼质量约 0.2 kg。现场实验以电机转速和滚筒倾角为输入变量，内导叶滚筒式收鱼机的输送率、功耗和鱼损率为输出变量。设定电机转速为 30、40、50 r/min，滚筒倾角为 10°、20°、30°。

4.2　实验与分析

4.2.1　可靠性实验

实验前装置空载运行 1 h 且正常运转，空载电流 1.02 A，计算空载功耗 224.4 W；实验过程中装置无故障运行；实验后装置空载运行正常且零部件无损坏，装置可靠性满足实验设定，装置实验数据如表 3 所示。

表 3　装置实验数据

Tab.3　Experimental data

倾角/(°)	转速/(r·min^{-1})	输送时间/s	工作电流/A	输送率/(t·h^{-1})	功耗/W
10	30	124	1.48	0.580	101.2
10	40	112	2.04	0.643	224.4
10	50	76	2.92	0.947	418.0
20	30	136	1.64	0.529	136.4
20	40	125	2.21	0.576	261.8
20	50	88	3.23	0.818	486.2
30	30	145	1.76	0.497	162.8
30	40	131	2.32	0.550	286.0
30	50	102	3.31	0.706	503.8

4.2.2　输送率与功耗实验

在倾角 10°、20°、30°时，输送率与转速之间的关系曲线如图 11 所示。当倾角不变时，输送率随转速增加而提高；当转速不变时，输送率随倾角增加而降低。在条件允许的情况下，可以增大转速和降低倾角来提高装置的输送率。

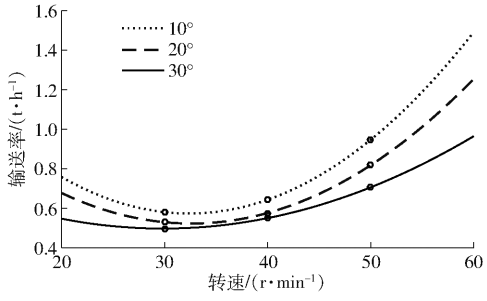

图 11　不同倾角下输送率与转速关系曲线

Fig. 11　Transmission rate at different speeds

在倾角 10°、20°、30°时，功耗与转速之间的关系曲线如图 12 所示。当倾角不变时，功耗随转速增加而提高；当转速不变时，功耗随倾角增加而升高。在条件允许的情况下，可以减小转速和降低倾角来减小装置的功耗。

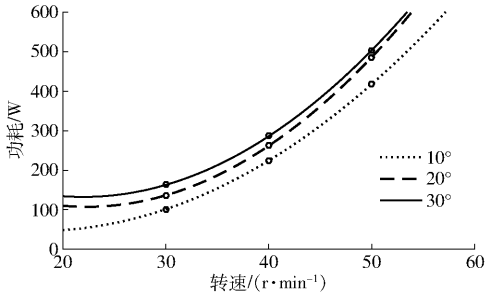

图 12　不同倾角下功耗与转速关系曲线

Fig. 12　Power consumption at different speeds

4.2.3　鱼损率分析

实验选用 105 条无伤金鲳鱼，9 组实验结束后，目测法统计金鲳鱼体表面损坏的数量为 1 条，总实验金鲳鱼数量为 945 条，计算鱼损率约为 0.1%。实验后鱼体损伤如图 13 所示。



图 13　实验后鱼体损伤

Fig. 13　Injured fish body after experiment

4.3　实验结果分析

在滚筒壳体长度一定的情况下，倾角不同被输送鱼的势能不同，装置的势能输送率定义为相同条件下输送率与鱼的势能之比。将势能输送率与功耗在不同转速情况下的比值作为优化控制方案的判据，得到势能输送率与功耗的比值（有效输送率，单位为%）如图 14 所示。从图中可以看出，同等条件下倾角发生变化时，倾角为 10°时比值最高；同等条件下转速发生变化时，转速在 10 ~ 20 r/min 区间比值最高，所以倾角为 10°、转速为 15.3 r/min 时装置传输效果最好，且不同倾角情况下转速控制在 15 r/min 左右最为经济。

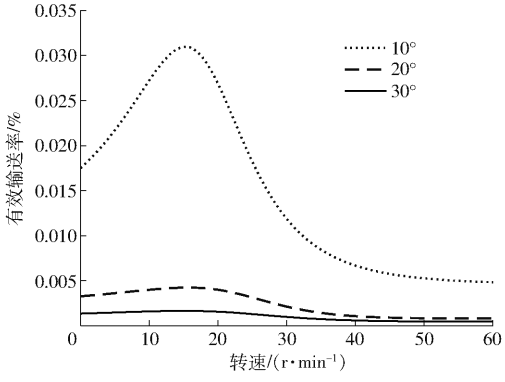

图 14　不同倾角下有效输送率随转速变化曲线

Fig. 14　Effective transmission rate at different speeds

5 结论

(1)针对深海网箱养殖人工收鱼效率低、且劳动强度大,吸鱼泵收鱼功率大、且需配备大型工作船使用等问题,设计了螺旋内导叶滚筒式收鱼装置。该装置在减轻人工劳作强度的同时提高了收鱼效率,渔船无需配备大型供电设备,节省了人力和财力。

(2)在本文实验装置特定参数下,滚筒壳体在倾角 10°、转速 15.3 r/min 时装置传输效果最优,且不同倾角下最优转速 15 r/min。经过实验,该装置的鱼损率约为 0.1%,在实现快速收鱼的同时不损伤鱼表面,保证了鱼的外表美观和经济价值。

参 考 文 献

[1] 章诚,李素霞. 渔业转型的社会学阐释:一个分析框架[J]. 中国海洋大学学报,2015,36(1):23 - 29.
ZHANG Cheng, LI Suxia. A sociological study on fishery transformation: an analytical framework [J]. Journal of Ocean University of China,2015,36(1):23 - 29. (in Chinese)

[2] 操戈,邓卫哲,徐承旭. 海南大力发展深海网箱养殖[J]. 水产科技情报,2017,44(2):109.

[3] 郭根喜. 我国深水网箱养殖产业化发展存在的问题与基本对策[J]. 南方水产,2006,2(1):66 - 70.
GUO Genxi. The existing problem and basic countermeasure in the industrialization development of deep-water net cage culture in China [J]. South China Fisheries Science,2006,2(1):66 - 70. (in Chinese)

[4] 黄一心,徐皓,丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. 渔业现代化,2016,43(2):76 - 81.
HUANG Yixin, XU Hao, DING Jianle. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China [J]. Fishery Modernization,2016,43(2):76 - 81. (in Chinese)

[5] 闫国琦,倪小辉,莫嘉嗣. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. 大连海洋大学学报,2018,33(1):123 - 129.
YAN Guoqi, NI Xiaohui, MO Jiasi. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipments: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University,2018,33(1):123 - 129. (in Chinese)

[6] 王春华. 国内外渔业装备与工程技术研究[J]. 渔业致富指南,2018(23):40 - 41.

[7] 潘强,施卫东,张德胜. 鱼友好型轴流泵流场数值分析与汽蚀性能优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):15 - 21.
PAN Qiang, SHI Weidong, ZHANG Desheng. Numerical analysis of flow field and cavitation performance optimization of fish-friendly axial-flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):15 - 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160403&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.003. (in Chinese)

[8] 云行. "十三五"规划之海洋篇[J]. 卫星应用,2016(6):24 - 25.

[9] 陈傅晓,谭围. 海南深水网箱养殖业发展存在的问题与基本对策[J]. 安徽农业科学,2015,43(29):59 - 61.
CHEN Fuxiao, TAN Wei. Problems and countermeasures of Hainan offshore cage aquaculture development[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2015,43(29):59 - 61. (in Chinese)

[10] COLIJN H. Mechanical conveyors for bulk solids[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1985.

[11] 陈昌平,王文,郑佳成,等. 水流作用下平面金属网衣水阻力特性数值模拟[J]. 大连海洋大学学报,2017,32(3):363 - 368.
CHEN Changping, WANG Wen, ZHENG Jiacheng, et al. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of the plane metal net under current[J]. Journal of Dalian Ocean University,2017,32(3):363 - 368. (in Chinese)

[12] 黄道沛,李存军. 基于负压原理的射流式吸鱼泵研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版),2016,35(4):354 - 357.
HUANG Daopei, LI Cunjun. Research on the jet type suction fish pump based on the principle of negative pressure[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science),2016,35(4):354 - 357. (in Chinese)

[13] GILL D R. Basics of flexible screw conveyors [J]. Plant Engineering,2003, 57(1):46 - 48.

[14] 王东霞. 螺旋输送机的数值分析及优化设计的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2012.
WANG Dongxia. The studies of numerical analysis and optimization design of screw conveyor [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology,2012. (in Chinese)

[15] BANERJEE I, PANGULE R C, KANE R S. Antifouling coatings: recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms[J]. Advanced Materials, 2011,23(6):690 - 718.

[16] 涂亚东. 螺旋输送机输送性能及螺旋体磨损研究[D]. 荆州:长江大学,2018.
TU Yadong. Study on conveying performance and screw body wear of screw conveyor[D]. Jingzhou: Yangtze University,2018. (in Chinese)

[17] 程韦武,庞莲香,蓝同平. 螺旋输送机的设计[J]. 现代制造技术与装备,2018(4):1 - 3.
CHENG Weiwu, PANG Lianxiang, LAN Tongping. Design of screw conveyor[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2018(4):1 - 3. (in Chinese)

[18] 余书豪. 垂直螺旋输送机输送特性及螺旋体的优化研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2017.
YU Shuhao. Research on the conveying characteristics and optimization of the screw structure of the vertical screw conveyor [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,2017. (in Chinese)

[19] KAPLAN O, CELIK C. An experimental research on woodchip drying using a screw conveyor dryer[J]. Fuel,2018,215:468 - 473.

[20] 孙晓霞,孟文俊,梁志坚,等. 基于 TCP 流稳定螺旋涡的垂直螺旋输送机的设计方法[J]. 北京理工大学学报,2017,37(11):1114 - 1121.
SUN Xiaoxia, MENG Wenjun, LIANG Zhijian, et al. Design method of a vertical screw conveyor based on Taylor - Couette - Poiseuille stable helical vortex[J]. Advances in Mechanical Engineering,2017,37(11):1114 - 1121. (in Chinese)

[21] LOMG X P, XU M S, LYU Q, et al. Impact of the internal flow in a jet fish pump on the fish[J]. Ocean Engineering,2016,126:313 - 320.

[22] 刘平,徐志强,徐中伟. 离心式吸鱼泵叶轮的设计[J]. 流体机械,2016,44(3):50 - 54.
LIU Ping, XU Zhiqiang, XU Zhongwei. Design of centrifugal fish pump impeller[J]. Fluid Machinery,2016,44(3):50 - 54. (in Chinese)

[23] 刘平. 基于 ANSYS CFX 的吸鱼泵的内部流场分析[J]. 流体机械,2014,42(11):43 - 46.
LIU Ping. Flow analysis of fish pump base on ANSYS CFX[J]. Fluid Machinery,2014,42(11):43 - 46. (in Chinese)

[24] CHEN M L, QU Y Y, YANG L, et al. Structures and antifouling properties of low surface energy non-toxic antifouling coatings modified by nano-SiO_2 powder[J]. Sciences China Chemistry,2008,51(9):848 - 852.

[25] QIAN P Y, LAU S C K, DAHMS H U, et al. Marine biofilms as mediators of colonization by marine macroorganisms: implications for antifouling and aquaculture[J]. Marine Biotechnology,2007,9(4):399 - 410.

[26] WOODCOCK C R, MASON J S. Bulk soilds handling [M]. London: Black & Son Limited,1987.

[27] WAGNER E J, DRISCOLL D M. Physiological stress responses of cutthroat trout to loading by fish pump, conveyor, or dip net [J]. Journal of Applied Aquaculture,1994(4):19 - 27.

[28] 王洪亮,施卫东,杨阳,等. 叶轮与导叶叶片数匹配对井用潜水泵性能的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):103 - 111.
WANG Hongliang, SHI Weidong, YANG Yang, et al. Matching number of blades between impeller and diffuser blade effect on performance of well submersible centrifugal pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):103 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180713&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.013. (in Chinese)

[29] 江伟,李挺,王玉川,等. 导叶式离心泵内部流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):121 - 128.
JIANG Wei, LI Ting, WANG Yuchuan, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in centrifugal pump with vane diffuser[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):121 - 128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170915&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.015. (in Chinese)

[30] 杨魏,雷晓宇,张志民,等. 基于载荷分布的潜水轴流泵叶轮与导叶水力设计[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):179 - 187.
YANG Wei, LEI Xiaoyu, ZHANG Zhimin, et al. Hydraulic design of submersible axial-flow pump based on blade loading distributions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):179 - 187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171122&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.022. (in Chinese)

[31] 吴子娟,梁武科,董玮,等. 活动导叶分布圆直径对混流式水轮机水力性能的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):140 - 147.
WU Zijuan, LIANG Wuke, DONG Wei, et al. Influence of guide vane distribution circle diameter on performance and internal flow characteristics of Francis turbine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):140 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190516&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.016. (in Chinese)