

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20251109001

http://www.yykxjz.cn/

洪扬, 江涛, 谌志新, 杨猛, 朱烨, 张智豪, 林礼群, 刘远昊. 基于长苗绳的海带连续采收设备关键技术研究及试验. 渔业科学进展, 2026, 47(2): 89-101

HONG Y, JIANG T, CHEN Z X, YANG M, ZHU Y, ZHANG Z H, LIN L Q, LIU Y H. Optimized continuous harvesting system for long-rope kelp. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(2): 89-101

基于长苗绳的海带连续采收设备 关键技术研究及试验*

洪扬 江涛^① 谌志新 杨猛 朱烨 张智豪 林礼群 刘远昊

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室 上海 200092)

摘要 针对我国长期以来海带(*Saccharina japonica*)人工采收作业效率低、劳动强度大,以及现有长苗绳海带采收样机存在捋切刀具易损伤苗绳等问题,本研究通过宜机化养殖模式优化与关键技术创新,研发了基于长苗绳的海带连续采收设备。首先,构建了长苗绳宜机化养殖筏架和16 mm宽快速脱卸挂扣,实现苗绳与筏架的可靠连接与快速分离;其次,研发了模块化的海带连续采收成套设备,建立了两端锚定的海带连续采收工艺。利用Ansys LS-DYNA软件对刀具在突发状况下开展了动力学仿真分析,在发生吊绳缠绕时刀具最大等效应力为405.04 MPa,远低于刀具材料屈服强度,验证了设计的结构强度可靠性。通过台架及海上综合试验验证系统装备性能,海上综合试验显示,在采收线速度9.36~14.82 m/min范围内,海带采净率为100%,苗绳无断裂破损。单架次采收时间为27~36 min,采收速率达2 t/(h·人),为传统人工的2倍,仅需4人配合作业,全程无重体力劳动。该系统实现了从苗绳分离、连续拖拽、捋切采收至苗绳收纳的全流程连续作业,解决了现有设备筏架适应性差、损伤率高的问题,为我国海带机械化采收的规模化推广提供了装备支撑。

关键词 海带; 机械化采收; 长苗绳筏架; 筏式养殖

中图分类号 S232.3 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)02-0089-13

海带(*Saccharina japonica*)是全球养殖产量最大的海藻品种(刘涛, 2019),具有显著的经济和碳汇价值(刘雅静等, 2024; 田月等, 2025)。2024年,我国海带年产量达186万t(干品)(农业农村部渔业渔政管理局等, 2025),位于世界第一。然而与庞大产量极为不对称的是目前我国仍高度依赖传统人工和少量简陋的半机械化设备来进行海带的育苗、植苗(Zhu *et al.*, 2023)和采收(常宗瑜等, 2018)等作业,其中,采收环节在整个海带养殖过程中投入的劳动力最为突出

(周小燕等, 2022; 吴忠迅等, 2024)。

国外养殖海带的采收设备均为针对长养殖苗绳养殖模式研发的,主要分为单绳扦插式(即将附着有孢子的育苗绳截取一段插入养殖绳进行养殖)(Hwang *et al.*, 2010、2016)和单绳围苗式(即将附着有孢子的育苗绳缠绕至养殖绳上进行养殖)(Flavin *et al.*, 2013)。其中,扦插养殖海带的采收主要运用上提式方法开展采收作业,借助机械臂或滑轮挂钩在原位将海带吊起,并转移至船内的指定位置。例如,挪威的

* 国家重点研发计划(2023YFD2400800)、现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-50)和中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD86)共同资助。洪扬, Email: hongyang@fmiri.ac.cn

^① 通信作者: 江涛, 研究员, Email: jiangtao@fmiri.ac.cn

收稿日期: 2025-11-09, 收修改稿日期: 2025-12-09

一种采收船配备折臂吊机,用于提起附着有养成海带的纜绳,将其移至船舱上方后,由人工沿绳切割海带,或者切开苗绳与纜绳间的绑缚绳以实现整绳采收(Seaweed Solutions AS, 2022);日本采用如下采收方式:首先将苗绳拖拽至船边,随后将海带及其根团一同切割并打捆,接着利用船载吊机的挂钩勾住根团,将其移动至指定位置,从而完成采收作业(Shigemo Fisheries Cooperative Association, 2020)。围苗养殖海带多采用牵引式方法进行采收作业,通过牵引机拖拽海带苗绳一端,将苗绳拖拽进指定位置完成采收工作,大幅节省人工,在日本、韩国等地广泛采用。例如,日本北海道岛牵的引式设备将海带苗绳连同浮球一并拖入船舱(Ebina Suisan, 2023);韩国采收船配有滑道,可将苗绳从海中拖出后人工切割海带柄部,使海带直接落入收获仓内(Park, 2015)。

我国海带养殖模式经过几十年的发展和沉淀,以筏式平行养殖为主(孙威等, 2022; 闫令东, 2021),主要依靠人工收获。因此,传统筏架结构在保持筏架安全性与产量最大化的前提下,兼顾了人工收获作业的可操作性。如筏架浮纜间苗绳总长为5~8 m,该长度在海带养成后,整根苗绳重量约100 kg,使作业人员的体力能够支撑将苗绳从水中拖拽至收获船上。福建等地虽研发了半机械化的海带采收装置,利用滑轮组将苗绳吊装至浮体船,一定程度上降低了劳动强度(郭隐彪等, 2012),但仍存在连续性不佳、劳动强度大等问题。基于山东地区传统养殖模式,俚岛地区设计了钩链式海带纜绳拖拽采收设备(Zhang *et al.*, 2017),山东理工大学(Wang *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025)研发了一种利用螺旋推进进出筏架的采收装备, Tan 等(2020)设计了纜绳牵引替代的采收装备。上述装备由于海况复杂,船体难以控制行进方向且极易破坏浮球或纜绳等筏架设施,不利于后续的养殖,因而未能大面积推广应用。以上研究表明,对于机械化收获而言,苗绳的重量已经不是主要矛盾,在复杂养殖海况下(樊星等, 2009)沿弯曲的柔性筏架艰难行驶,并频繁地提升、放下苗绳,严重地阻碍了收获作业的连续性,采收效率低,无法体现机械化收获的优势。因此,亟需对养殖筏架进行宜机化改造。严瑾等(2024)对桑沟湾海带进行了单绳式吊挂养殖模式的初步研究,由于光照和水深等环境因素,单位产量仅为传统养殖模式的60%;江涛等(2022)建立了两端锚定的海带连续机械化采收模式,在传统筏架基础上构建了以“弓”字形长苗绳(即单个筏架使用一根长度为300 m的养殖苗绳)替代传统短苗绳的宜机化筏架,同时,基于长苗绳筏架研发了海带连续机械化采收装备

样机,在海上试验平台上实现了海带机械化连续采收,完成了海带机械化高效采收从“0”到“1”的突破,但需要进一步开展小型专业化采收船及船载装备系统性的设计、优化及研发,以实现产业化应用。

本研究基于海带长苗绳养殖筏架,在海带连续机械化采收装备样机基础上,研发模块化连续采收成套设备,并在3级海况下开展综合采收试验,以期为海带采收产业化应用提供技术和装备支撑。

1 宜机化海带养殖模式与连续采收工艺

1.1 单绳养殖筏架结构设计

根据海带机械化采收的要求,以山东荣成爱伦湾传统海带养殖筏架为基础,将海带苗绳优化为长苗绳结构,长苗绳以“ \square ”形迂回串联(基于传统筏架的两根主纜绳,采用挂扣方式将长度为300 m的苗绳与纜绳相连接,其外形维持与传统养殖模式相同),形成适宜机械化(以下简称“宜机化”)作业的长苗绳筏架,如图1所示。筏架有效长75 m,宽5.0 m,苗绳在筏架宽度方向挂接长度4.6 m,两相邻节点间距1.5 m。苗绳按4.6 m段夹苗,夹苗数量与传统模式一致。为使长苗绳与吊绳快速分离,特设计长苗绳筏架专用挂扣(以下简称“挂扣”)。挂扣主体选用高强度尼龙材料,吊绳自挂扣上部直径为6 mm的小圆孔穿入后进行打结处理。该小圆孔下方设置有直径为10 mm的通孔,其作用在于收纳打结后的吊绳绳结,确保挂扣不会脱落。

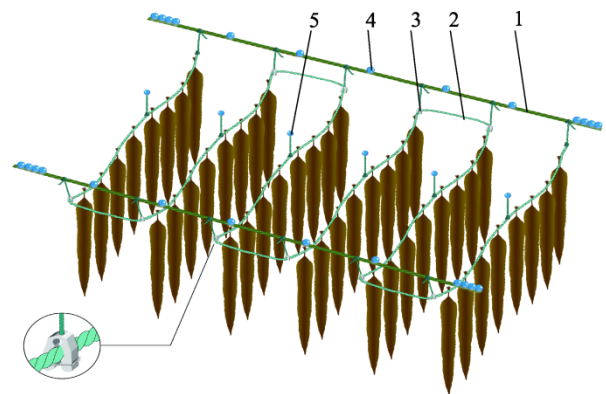


图1 长苗绳养殖筏架结构设计图

Fig.1 Structural diagram of the long seedling rope culture raft frame

- 1: 筏架纜绳; 2: 长苗绳; 3: 长苗绳筏架专用挂扣;
4: 纜绳上浮漂; 5: 苗绳上浮漂。
1: Raft frame rope; 2: Long seedling rope; 3: Special hook for raft frame on long seedling rope; 4: Float for rope; 5: Float for seedling rope.

为保证在养殖过程中苗绳不轻易出现滑移、脱落现象,同时便于海带采收时苗绳与挂扣的分离,挂扣中部设有最大开度为 14 mm 的椭圆状弹性开口,并配备直径为 3 mm 的可旋转金属搭扣,用于嵌入长苗绳的折弯段。苗绳嵌入后,将底部金属搭扣旋转至水平卡槽位置并锁定,此时苗绳被夹紧,不易松动。脱扣时,作业人员将其拎出水面,用手将金属搭扣向下掰出卡槽,挂扣呈打开状态,在采收设备拖拽力作用下即可实现苗绳与挂扣的快速分离。

1.2 连续采收工艺设计

经过初代样机试验,针对采收核心装置开展了模块化设计,将连续采收成套设备分解为作业平台、矩形导向装置、斜式输送机、摩擦牵引绞车、捋切刀具、转运输送带、收割后苗绳收纳装置及动力与液压操作系统等 8 个功能模块,各模块具备独立功能且接口标准化(图 2)。以矩形导向装置为例,其采用 4 根纵横交错布置的无动力辊筒,通过非对称布局形成流体导向面,有效抑制养成海带脱扣后因水流作用产生的漂移现象;斜向输送带主要应用于海带自水面提升至一定高度时的托举作业,旨在避免其在拖拽过程中因受力过大而脱落;转运输送带主要用于切割后海带转运至采收后海带收纳船上。模块间通过法兰与平台连接,实现快速拆装与维护。创新性地将液压推进系统与采收执行机构集成于同一操作台,采用比例阀与 PLC 协同控制技术,实现采收速度、刀具切入深度等

参数的实时调节。通过集成控制,操作人员可同时完成设备定位、采收启停及故障诊断,单人即可完成平台与设备操控。且可针对不同采收需求替换相应模块。

作业流程:基于长苗绳筏架,采收海带时采收船锚泊固定在筏架一端,取近船筏架长苗绳首端顺序穿过矩形导向辊筒、斜式输送机、捋切刀具内孔,绕过滑轮后与牵引绞车相连接。筏架侧边小船上的操作人员逐一将挂扣打开,苗绳在摩擦牵引绞车牵引力和水阻力作用下逐渐被拉伸展开并拖拽进入采收设备。高速旋转的捋切刀快速将海带与绳分离,绳被收纳装置规整收纳。海带落在下方的转运输送带上,被输送至一旁停靠的运输船舱内。输送带可伸缩调节,使舱内海带铺匀。当运输船载满海带驶离后,对后续停靠的运输船进行相同操作。当绞盘上绳满时,可更换绞盘或释放绞盘的绳后,继续捋切采收海带。

2 关键装置设计

2.1 捋切刀具设计

在捋切作业过程中,苗绳持续穿过刀具孔道,海带在重力作用下自然垂落至带式输送机表面。因海带根柄剪切刀端部向外延展,其首先与苗绳上的海带根柄相接触并完成切断操作,促使海带与苗绳分离,随后假根剪切刀对海带假根进行切除。初代刀具依据悬链线理论进行设计,要求苗绳在标准作业状态下的垂荡角度 $\beta \leq 25^\circ$ (Jiang *et al*, 2022)。然而,实际海上作

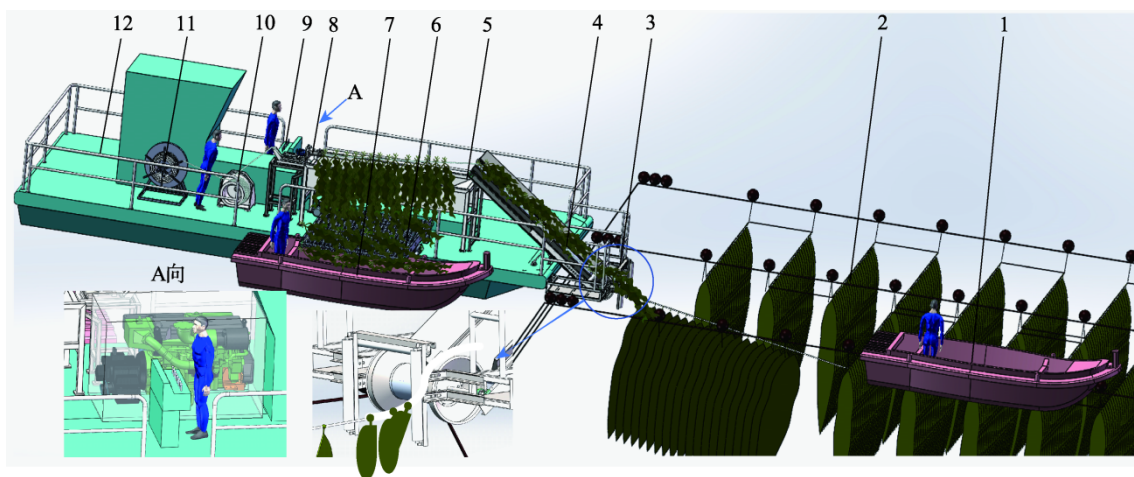


图 2 海带采收设备整体结构设计与作业流程图

Fig.2 Overall structure design and operation flow chart of kelp harvesting equipment

1: 脱扣作业船; 2: 长苗绳筏架; 3: 矩形导向辊筒; 4: 斜式输送机; 5: 机架; 6: 转运输送带; 7: 采收后海带收纳船;
8: 捋切刀具; 9: 动力与液压操作系统; 10: 摩擦牵引绞车; 11: 苗绳收纳装置; 12: 作业平台。

1: Trip working vessel; 2: Long seedling rope raft frame; 3: Rectangular guide rollers; 4: Inclined conveyor; 5: Frame;
6: Rotary conveyor belt; 7: Kelp storage ship after harvest; 8: Shearing tools; 9: Power and hydraulic operating system;
10: Friction traction winch; 11: Seedling rope storage device; 12: Mini platform.

表1 海带采收设备主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of kelp harvesting equipment

项目 Items	参数及形式 Parameters and forms
作业平台尺寸(长×宽×高) Size (length×width×height) /mm×mm×mm	12 000×5 000×3 500
采收装备尺寸(长×宽×高) Size (length×width×height) /mm×mm×mm	10 500×3 500×1 600
液压操作平台(长×宽×高) Size (length×width×height) /mm×mm×mm	10 000×400×800
设备重量 Total weight/kg	800
发动机额定功率 Engine rated power/kW	130
发动机额定转速 Engine RPM/(r/min)	2 300
采收效率 Harvest efficiency/(t/h)	~15
平台作业人数 Platform workers	3
刀具形式 Tool type	旋转捋切
采收方式 Harvest method	两端锚定、连续牵引

业环境复杂,存在海洋垃圾等干扰因素,易致使苗绳因拖拽力而产生大角度垂荡,进而引发刀具误切苗绳的情况,造成苗绳受损、杂物堵塞刀头,影响采收作业的连续性,同时,刀具结构强度不足,易因冲击而损坏等问题。

为提升刀具的可靠性,针对捋切刀具展开优化设计(图3)。一方面,选用高强度的刀具材料3Cr13进行刀具加工并实施表面热处理,以增强其硬度与结构强度,并增设外刀刀圈,借助整体结构设计提高抗冲击性能;另一方面,开展防误切设计,增大剪切内刀与外刀连线的水平夹角 α ,防止垂荡的苗绳被剪切。

$$\alpha = \arctan \frac{D_1 - d_1}{2(l_0 + b)} \quad (1)$$

式中, D_1 为外刀直径(mm); d_1 为内刀直径(mm); l_0 为外刀内外刀头连线距离(mm); b 为刀圈宽度,此处设计为6 mm。

其中, l_0 的取值需匹配采收线速度:为避免海带切割过程中弯曲或拉断,需确保刀口在海带进给时完成完整切割。为此,刀口有效宽度设计为所需切割宽度的2倍;海带根柄内层剪切刀设4个刀片,刀具每旋转一周最多可完成4次根柄切割。由此推导得:

$$\frac{l_0}{2} \geq \frac{v_{\max}}{4n_{\min}} \quad (2)$$

式中, v_{\max} 为采收最大线速度,此处取20 m/min; n_{\min} 为刀具最低转速,基于经验取值500 r/min。

根据对串接苗绳直径、海带根柄长度和直径等数据进行统计,苗绳首尾对接绳结直径40 mm,设计内刀直径 d_1 为45 mm;根柄长度为(59.74±5.86) mm,设计外刀直径 D_1 为120 mm;为保证完整切割,设计刃口 l_0 为20 mm,外刀刀圈 b 为6 mm。

将上述参数代入式(1),得出 $\alpha_{\max}=55.26^\circ$ 。作业过程中,只需保持苗绳垂荡角度 $\beta \leq \alpha$ 即可。

进一步计算刀具受力:

$$F_d = k_s \tau_s A = k_s \tau_s \frac{\pi d_{\max}^2}{8} \quad (3)$$

$$T = F_d R_m \quad (4)$$

式中, F_d 为刀具的剪切力(N); k_s 为安全系数,取1.5; τ_s 为海带柄部的平均剪切应力,实验测定为1.48 MPa; A 为剪切的横截面面积,因内外刀形成双面剪切,取根柄横截面积的1/2; d_{\max} 为随机测得根柄的最大直径,为16 mm; T 为刀具剪切所需扭矩(Nm); R_m 为剪切力的作用半径,此处为外刀半径60 mm。

计算结果: $F_d=223$ N; $T=13.4$ Nm。

2.2 采收后苗绳收纳装置设计

长苗绳筏架在采收后苗绳杂乱且整理费人费力,据此设计了采收后苗绳收纳装置,如图4所示。该装置为伞辐状结构,为切合养殖实际,有效收纳长度为300 m(荣成地区单个筏架养殖长苗绳总长,可根据需求设计不同容绳量)。该收纳盘由液压马达驱动,在收纳装置转动轴末端与皮带轮的连接处,设计有摩擦盘片。通过摩擦盘片与收纳转盘实现动力传递,可按需对摩擦扭矩进行调节。作业时的操作策略:苗绳收纳装置的旋转线速度略高于采收线速度,收纳装置的液压马达持续提供回转动力。当采收速度降低时,苗绳所受拉力增大,致使摩擦盘片提供的静摩擦力达到极限,进而使皮带轮出现空转现象,此时收纳装置停止转动;待苗绳松弛后,收纳装置恢复转动,以此达成收纳速度与作业速度的自适应匹配。收纳结束后,拔出收纳盘左端的滑动套的定位销,滑动套沿轴向左侧移动,此时铰接而成的伞辐状辐射盘左端外接圆直径变小,缠绕在收纳盘上的苗绳瞬间得以松弛。为简化计算,将绳盘单圈盘绳量简化为单圈多边形周长(罗振兴,2012),收纳容绳计算:

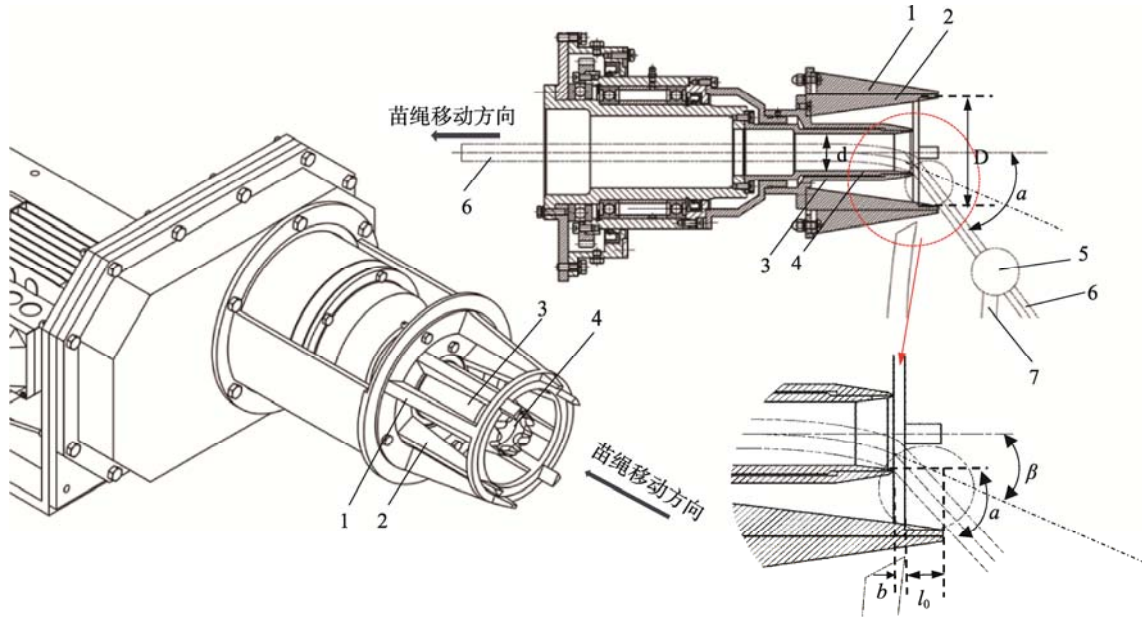


图 3 捋切刀具设计
Fig.3 Cutting tool design

- 1: 海带根柄外层剪切刀; 2: 海带根柄内层剪切刀; 3: 海带假根外层剪切刀;
- 4: 海带假根内层剪切刀; 5: 海带假根根系; 6: 苗绳; 7: 海带根柄。

1: Outer shearing blade for kelp rootstock; 2: Inner shearing blade for kelp rootstock; 3: Outer shearing blade for kelp pseudorhizome; 4: Inner shearing blade for kelp pseudorhizome; 5: Kelp pseudorhizome system; 6: Seedling rope; 7: Rootstock.

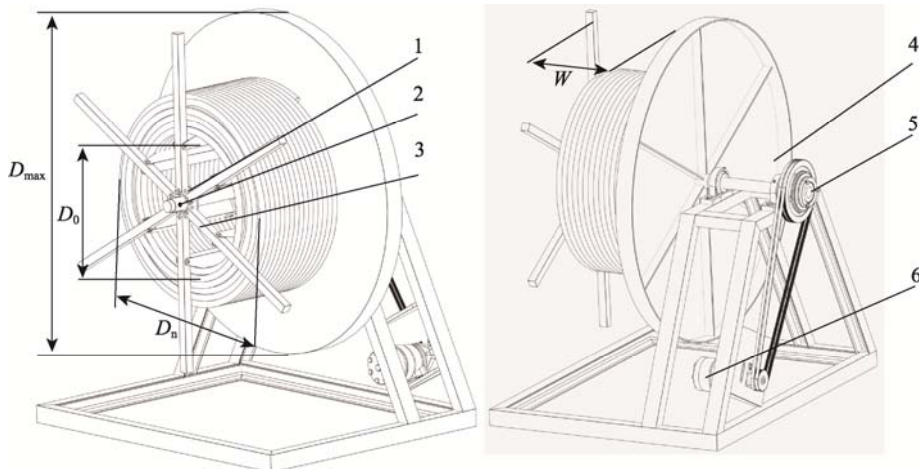


图 4 采收后苗绳收纳装置设计图

Fig.4 Design diagram for the seedling rope storage device after harvesting

- 1: 滑动套; 2: 定位销; 3: 伞辐状辐射盘; 4: 收纳盘; 5: 摩擦盘片; 6: 液压马达

1: Sliding sleeve; 2: Positioning pin; 3: Umbrella-shaped radial disc; 4: Storage disc; 5: Friction disc; 6: Hydraulic motor.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_n = D_0 + (2n - 1) d \\ C_n = x D_n \sin\left(\frac{\pi}{x}\right) \\ m = \frac{W}{d \cdot k} \\ L = \sum_{n=1}^N (C_n \cdot m) \end{array} \right. \quad (5)$$

式中, D_n 为苗绳缠绕第 n 圈时外接圆直径(mm); D_0 为收纳盘多边形外接圆直径, 根据经验 D_0 取 350 mm; d 为苗绳直径, 取 18 mm; C_n 为单圈苗绳收纳周长 (mm); x 为多边形边数, 此处取 6; m 为每层最大圈数; k 为间隙系数, 一般取 1.05~1.10, 此处取 1.10。 W 为绞盘宽度(mm), 不超过 600 mm。

将上述参数代入式(5), 为满足 300 m 苗绳收纳,

得出 $n=7$ 。设计留有余量,取 $N=8$,得出 $D_{\max}=620$ mm,设计伞辐状辐射盘半径 310 mm。对收纳盘进行验证:

$$L_{\max} = \sum_{n=1}^7 (C_n \cdot m) = 299.88 \text{ m} \approx 300 \text{ m} \quad (6)$$

满足设计需求。

2.3 动力与液压操作系统设计

该动力系统采用全液压驱动,基于模块化设计,主要由泵源组件、操作阀组件、执行组件三部分组成,如图 5 所示。泵源组件通过双联叶片泵实现流量与压力分级,分别驱动推进系统与海带采收单元。推进系统通过手动三联阀对推进马达、转向马达与侧推马达的无级调速控制;海带采收单元则通过手动五联阀实现对执行组件中输送马达、切刀马达、收绳马达、绞盘马达的无级调速控制。多联阀的叠加设计实现多个执行机构的集中控制,显著减少管路连接,适合小型平台的紧凑布局要求。同时,每组阀体集成压力补偿单元与负载敏感控制模块,确保多执行机构并联工作时的流量动态分配,单动作与复合动作模式下的压力稳定性。动力系统主要技术参数见表 2。

3 台架与海上性能试验

3.1 养殖挂扣力学性能实验与分析

为分析挂扣可行性,试制了不同宽度的养殖挂扣,如图 6a 所示。使用绿林 6 寸重型台虎钳台(简称“虎钳台”)、艾锐普数显式推拉力计(SF-500)和 S 形传感器(DYLY-104)测量关键力学性能,测量方法如图 7 所示。①滑动力(锁紧后苗绳在挂扣中滑动的力):将挂扣固定在虎钳台上,使用 SF-500 拉力计沿图 7a 所示方向匀速拖拽苗绳,当苗绳滑动即记录最大拉力值;②脱扣力(正常打开挂扣所需力):将挂扣固定在虎钳台上,使用 SF-500 拉力计钩住金属搭扣,沿图 7b 所示方向匀速拖拽,当金属搭扣脱离,记录最大拉力值;③脱绳力(挂扣脱离时苗绳从扣中脱出力):将挂扣固定在虎钳台上,挂扣两端用辅助绳连接,使用 SF-500 拉力计钩住辅助绳,沿图 7c 所示方向匀速拖拽,当苗绳脱离挂扣,记录最大拉力值;④破坏脱扣力(苗绳从锁紧挂扣中脱出力):经实验测试,吊绳先于挂扣破坏,故采用强度更高的替代绳开展挂扣破坏脱扣力测试,固定吊绳替代绳,使用 DYLY-104 拉力传感器

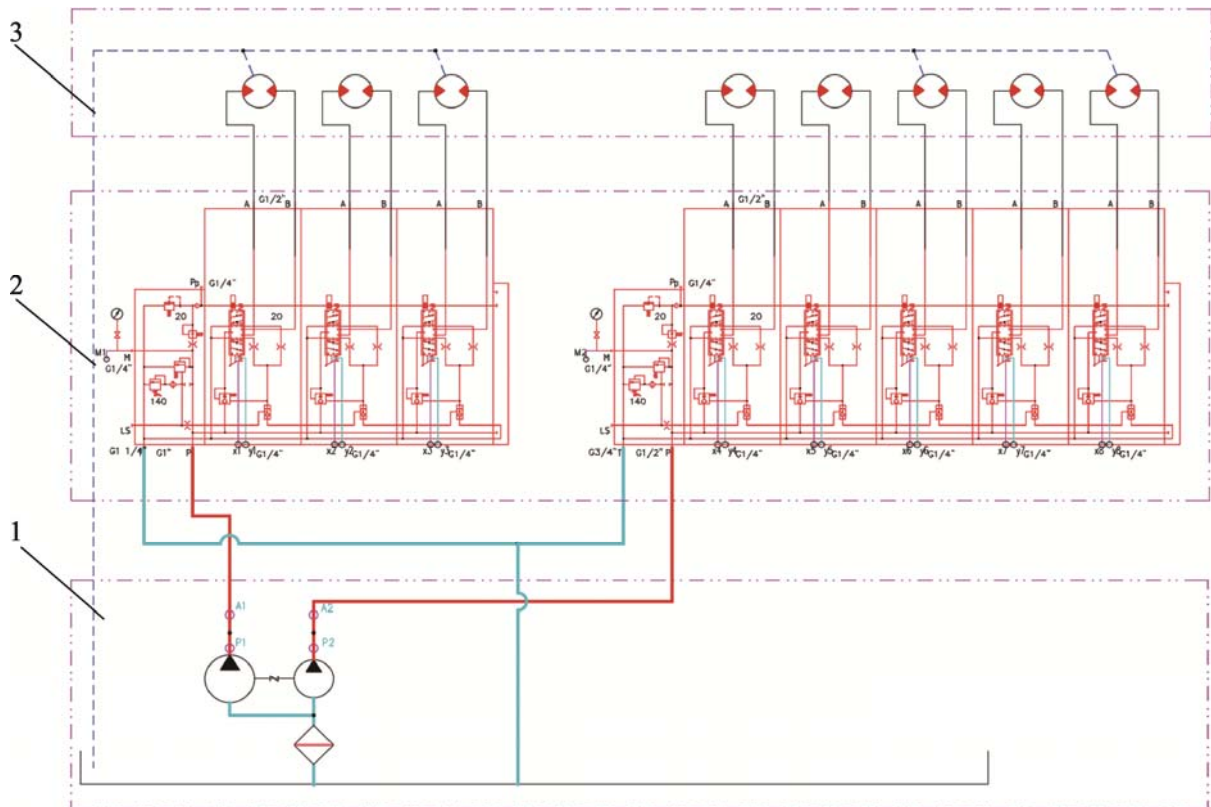


图 5 海带采收设备液压控制系统设计图

Fig.5 Design diagram of hydraulic control system for kelp harvesting equipment

1: 泵源组件; 2: 操作阀组件; 3: 执行组件

1: Pump source component; 2: Operation valve component; 3: Actuator component

表 2 海带采收设备动力系统主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of power system for kelp harvesting equipment

装置名称 Device	设计转速 Design speed /(r/min)	流量 Flow /(L/min)	额定压力 Rated pressure /MPa	动力元件型号 Power element model
双联泵 Duplex pump	600~1 800	~135.9/~92.7	21	PV2R23-76/53
主推进器 Main thruster	~870	~69.6	21	A2F80R2P1
侧向推进器 Side thruster	~870	~47.9	21	A2F55R2P1
斜式输送机马达 Inclined conveyor motor	-15~15	~1.5	16	BMR100
捋切刀具马达 Rolling cutter motor	-600~4 000	~40.0	21	GM5-10-1FE13S-20
牵引绞车马达 Tow winch motor	0~30	~24.3	16	KBR8-800
转运输送带马达 Transfer conveyor belt motor	0~70	~7.0	16	BMR100
苗绳收纳装置马达 Miao rope storage device motor	0~20	~2.0	16	BMR100

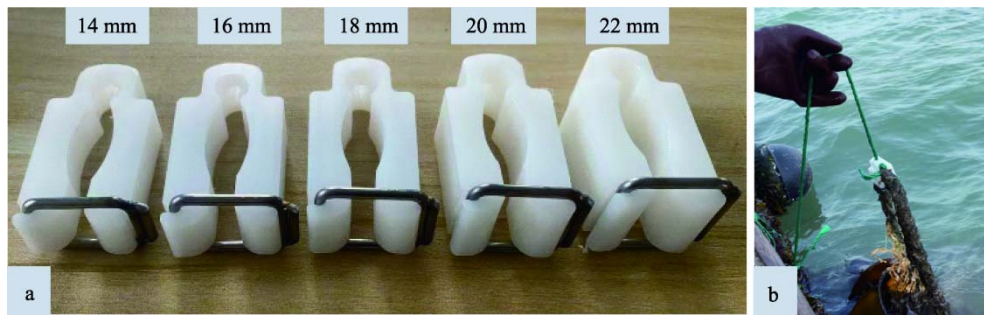


图 6 适宜单绳养殖筏架挂扣与海上试验

Fig.6 Suitable single-rope aquaculture raft frame knots and sea trial

a: 不同宽度挂扣; b: 挂扣海上养殖状态。

a: Different rope knots widths; b: Rope knots in marine aquaculture conditions.

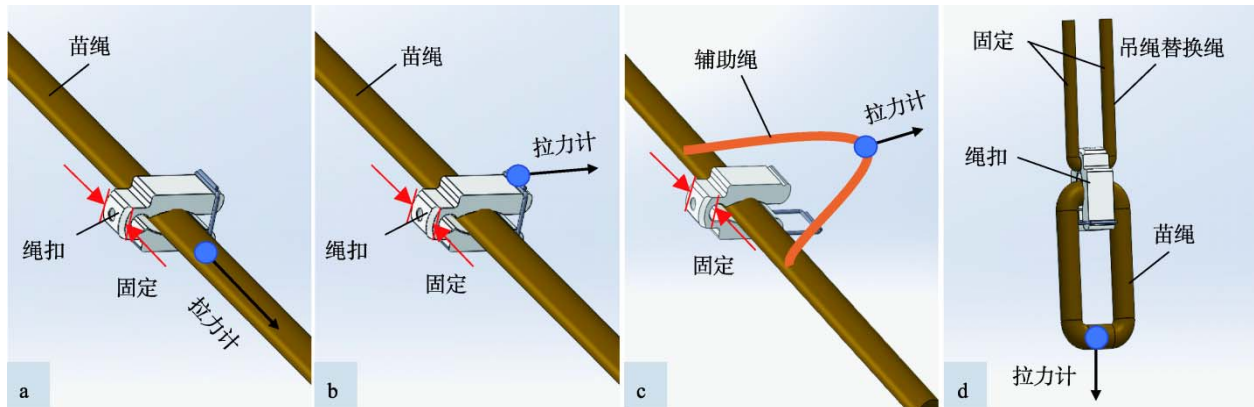


图 7 挂扣力学性能实验测量方法示意图

Fig.7 Schematic diagram of experimental measurement method for mechanical properties of rope hook

a: 滑动力测量方案; b: 脱扣力测量方法; c: 脱绳力测量方法; d: 破坏脱扣力测量方法。

a: Measurement scheme for sliding force; b: Measurement method for trigger release force;

c: Measurement method for rope release force; d: Measurement method for breaking trigger limit force.

钩住苗绳,沿图 7d 所示方向匀速拖拽直至挂扣破坏,记录最大拉力值。

以上实验使用 14、16、18、20、22 mm 厚度的挂扣均开展 5 组实验,每组实验重复 3 次及以上。

由于挂扣上方采用 5 mm 直径吊绳与绳连接,因此,破坏脱扣力极限力大于吊绳极限拉力即能满足实际作业需求。如图 8d 所示,实验测得吊绳极限拉力为(1532.33±114.86) N,测得 14 mm 和 20 mm 挂扣

组破坏脱扣力与吊绳极限拉力无显著差异($P>0.05$), 其他3种挂扣破坏脱扣力均显著大于吊绳极限拉力($P<0.05$); 在滑动力和脱扣力方面, 22 mm挂扣组显著大于14 mm挂扣组($P<0.05$), 与其他3组无显著差异($P>0.05$) (图8a, 图8c); 就脱绳力而言, 14 mm挂扣组最低且显著低于其他4组($P<0.05$), 16 mm挂扣组显著低于20 mm和22 mm组($P<0.05$), 18 mm挂扣组显著低于22 mm挂扣组($P<0.05$) (图8b)。综合考

虑其力学性能、结构适配性与经济性, 选择16 mm宽养殖挂扣作为单绳养殖挂扣。定制了100个16 mm宽挂扣, 在山东省荣成市爱伦湾养殖区开展了一个养殖周期的综合试验, 如图6b所示。养殖试验结果表明, 该挂扣在养殖周期内可实现养殖筏架中缆绳与苗绳的可靠连接, 挂扣内苗绳、吊绳未出现脱扣、滑移、破损现象。且布苗和采收环节能较省力地将长苗绳压入和脱出挂扣椭圆状弹性开口。

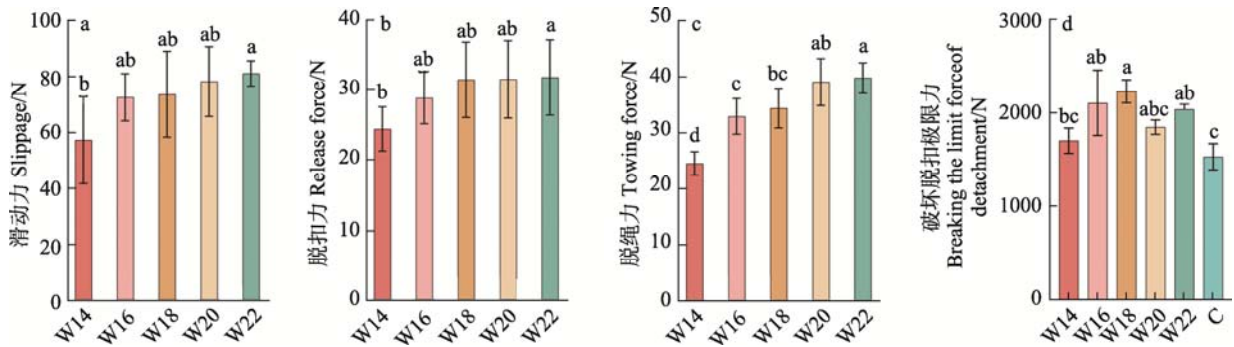


图8 挂扣关键力学参数

Fig.8 Key mechanical parameters of the rope knot

a: 滑动力; b: 脱扣力; c: 脱绳力; d: 破坏脱扣极限力。W14~W22: 14、16、18、20、22 mm挂扣; C: 吊绳极限拉力。

a: Sliding force; b: Trigger release force; c: Rope release force; d: Breaking trigger limit force.

W14~W22: 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, and 22mm rope knot; C: Maximum pull strength of the rope.

3.2 刀具结构强度仿真

当刀具遭遇异物(如吊绳缠绕)时, 刀具极易受损。鉴于此, 运用Ansys LS-DYNA对捋切刀具在吊绳缠绕状态下的受力情况展开分析。为便于分析, 仅针对吊绳与刀具接触受力开展简化分析。借助SolidWorks软件构建海带根柄内层剪切刀与吊绳的简化三维模型。在材料属性设置方面, 依据结构钢和聚乙烯材料数据, 将其输入至用户材料模块界面列表。为模拟吊绳缠绕, 约束条件设定如下: 吊绳与动刀片端部接触, 吊绳两端设置为固定支撑以模拟缠绕状态, 刀具转速设为500 r/min, 并约束其余5个自由度。

网格划分采用粗细网格相结合的方式, 即在刀具与吊绳的接触范围内进行网格划分。吊绳的单元定义尺寸为0.5 mm, 吊绳其余部位网格单元定义尺寸为1 mm, 刀具的网格单元定义尺寸为2 mm。网格划分后, 约包含3.62万个节点和15.72万个单元, 网格结构较为理想。

仿真结果如图9所示, 其中5 mm尼龙绳经过换算极限拉伸强度为191.08 MPa (SC/T4021-2007), 因此, 当绳子等效应力达到245.98 MPa, 远超吊绳拉伸强度, 刀具最大等效应力为405.04 MPa, 应力主要集

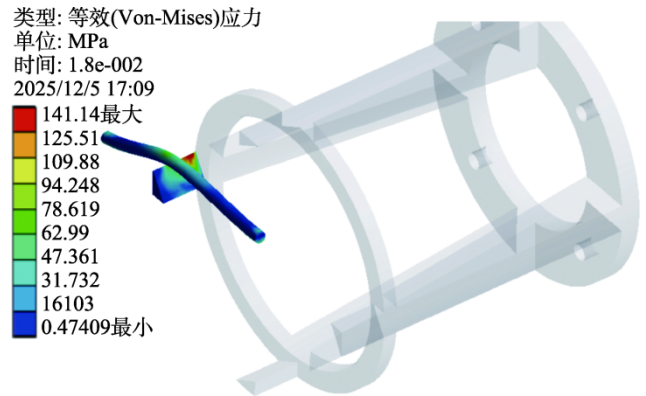


图9 刀具-吊绳缠绕模拟仿真结果

Fig.9 Simulation results of tool-hang rope winding

中于刀具与刀体的连接部分。其等效应力远低于刀具结构材料(3Cr13)的屈服强度540 MPa (徐国胜等, 2019), 表明吊绳的缠绕不会对刀具造成损坏。

3.3 海上综合试验

试验方法: 为验证基于长苗绳的海带连续采收系统装备整机作业效果, 在自然养殖环境下开展了海上综合采收试验。试验地点围绕山东省荣成市爱伦湾的低区和中区海带养殖区, 该地区属于我国北方典型海带养殖区域; 时间为2025年6月下旬的海带丰收季,

采收对象为依托双绳筏架养殖的单绳串联海带。试验设备包括小型化采收系统装备、流速仪、秒表等。每一个养殖区分别对 3 组自然养成的筏架进行海上综合采收试验, 如图 10 所示。每组试验配备设备操作

人员 3 人、解扣 1 人。严格按照系统各设备操作规程操作, 做好现场试验环境条件记录, 根据海带采收作业流程开展试验, 并对采收关键指标进行了测试与记录, 结果如表 3 所示。

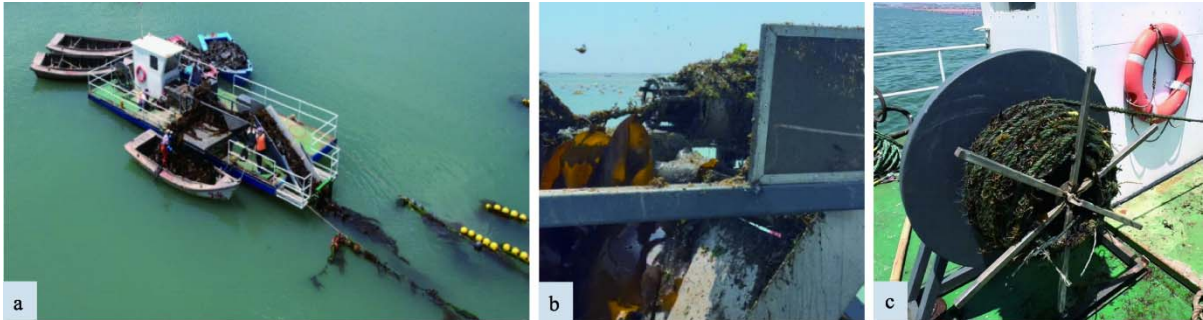


图 10 海上综合采收试验

Fig.10 Integrated offshore harvesting experiment

a. 海试总体状态; b. 捋切刀具作业状态; c. 收纳装置作业状态
 a. Overall sea trial status; b. Cutter blade operation status; c. Storage tray operation status.

表 3 海上综合试验结果

Tab.3 Results of comprehensive offshore test

项目 Items	爱伦湾中区 Offshore area of Ailun Bay			爱伦湾低区 Nearshore area of Ailun Bay		
	试验组 1 Test group 1	试验组 2 Test group 2	试验组 3 Test group 3	试验组 1 Test group 1	试验组 2 Test Group 2	试验组 3 Test Group 3
	浪高 Wave height/m	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8
风速 Wind [air] speed/(km/h)	西南风/23	西南风/22	西南风/24	南风/24	南风/27	南风/27
流速 Current velocity/(m/s)	0.60	0.69	0.63	0.52	0.38	0.37
采收线速度 Harvest line speed/(m/min)	9.36	11.34	14.82	9.41	11.72	15.23
换收纳船时间 Emptying the collection boat time/min ^a	3.59	3.47	3.45	3.07	3.21	3.78
更换筏架时间 Ripper replacement time/min ^b	2.13	2.25	2.5	1.83	2.08	1.97
采收中断次数 Number of harvest interruptions/次 ^c	0	1	2	0	0	1
采收中断时间 Harvest interruption time/min	0	1.75	3.05	0	0	2.25
单个筏架采收时间 Harvesting time per raft/min ^d	37.77	33.93	29.24	36.78	30.89	27.69
海带采净率 Kelp harvesting rate/%	100	100	100	100	100	100
苗绳破损 Rope damage	无	无	无	无	无	无
单架采收量 Harvest per unit/t	4.19	4.17	4.13	4.51	4.46	4.41
作业人数 Number of workers	3+1	3+1	3+1	3+1	3+1	3+1
平均采收效率 Average harvest efficiency/(t/h·人)	1.66	1.84	2.12	1.84	2.17	2.39

注: a. 换收纳船: 将载满海带的船换为空船; b. 更换筏架: 采收完一筏架后, 将船锚定至相邻筏架; c. 采收中断: 采收过程中因偶发杂物缠绕刀具等突发情况导致的中断; d. 单个筏架采收时间: 收割、换船、中断、更换筏架等操作的时间总和。

Note: a. Emptying the collection boat: Replacing the boat loaded with kel with an empty one; b. Replacing the rafts: Anchoring the boat to the adjacent rafts after harvesting one raft; c. Harvesting interruption: Unexpected interruptions during harvesting, such as debris entanglement in the cutting tools; d. Harvesting time per raft: The total time for harvesting, replacing the boat, handling interruptions, and changing rafts.

在海上综合性能试验中,研发的海带采收设备顺利完成6架次养殖筏架的采收任务,整体运行表现稳定高效。以桑沟湾中区采收工人的平均采收情况为参照,本设备在相同作业总时间内的理论平均采收速率为1.86 t/(h·人),人均采收效率约为传统人工的2.09~2.78倍,全程无需重体力劳动投入,并可实现连续长时间作业,如图11所示。这一效率优势不仅有助于缓解季节性劳动力短缺问题,也为规模化海上养殖提供了可行的机械化解方案。

单台筏架采收量达4.31 t,与理论产量基本持平,进一步验证了设备在实际采收过程中的综合采收能

力。运行期间,海带采净率为100%,苗绳无破损、刀具无损伤,表明设计的刀具在复杂海况下具有较高的稳定性;平均每台筏架仅出现0.67次中断,平均中断时长为2.35 min,主要由于筏架内存在养殖废弃的蛇皮袋、绳索等附着在苗绳上,导致刀具堵转导致,鉴于优化了刀具的结构强度并在刀具前端增加刀圈,操作人员可快速解决此类状况。值得注意的是,海洋环境条件对设备运行影响显著,尤其是波浪与海流因素对采收平台与采收装备的协同作业造成一定干扰,提示未来在离岸复杂海况下的采收系统设计中,应更加重视平台与执行机构的动态匹配性与环境适应性优化。

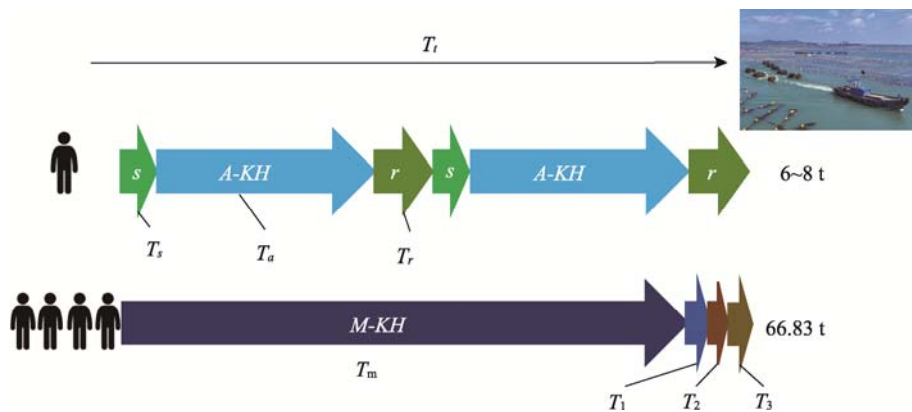


图11 本文研发设备与人工采收海带对比

Fig.11 Comparison of the equipment developed in this paper with manual harvesting of kelp

T_t : 以桑沟湾养殖区中区为例,采收工人每天的平均总工作时长,为9 h; T_s : 运输工人至采收地点的平均时间,为0.5 h;

T_a : 人工采收3~4 t海带的平均作业时间,为3 h; T_r : 运输装载海带的舢板船至码头的平均时间,为1 h;

T_m : 以9 h为总工作时长,研发设备的理论平均采收时间,为7.02 h; T_1 : 以9 h为总工作时长,研发设备的理论平均换收船时间; T_2 : 以9 h为总工作时长,本项目研发设备的理论平均采收中断时间;

T_3 : 以9 h为总工作时长,研发设备的理论平均更换筏架时间。

T_t : Taking the middle zone of Sanggou Bay aquaculture area as an example, the average total daily working hours for harvesting workers is 9 h; T_s : The average time for transporting workers to the harvesting site is 0.5 h; T_a : The average operation time for manual harvesting of 3~4 tons of kelp is 3 h; T_r : The average time for transporting the loaded sampan boat to the dock is 1 h;

T_m : With a total working duration of 9 h, the theoretical average harvesting time for the developed equipment is 7.02 h;

T_1 : With a total working duration of 9 h, the theoretical average time for emptying the collection boat for the developed equipment; T_2 : With a total working duration of 9 h, the theoretical average harvesting interruption time for the developed equipment. T_3 : With a total working duration of 9 h, the theoretical average time for replacing rafts for the developed equipment.

整体来看,该海带采收设备在采收效率、采净率与运行稳定性方面均展现出良好性能,为海上养殖机械化提供了可靠的技术支撑。未来研究可在提升系统对复杂海洋环境的适应能力、降低自然因素干扰方面进一步探索,例如通过结构优化、智能控制等策略增强装备在多变海况下的抗扰动能力,从而进一步提升采收系统的综合应用能力与推广潜力。

4 结论

(1) 构建了适配机械化采收的宜机化养殖筏架

针对传统筏架机械化采收适应性差的问题,创新设计了长苗绳迂回串联式筏架。该筏架采用单个长度达300 m的苗绳与16 mm宽快速脱卸挂扣相结合,实现了苗绳与筏架之间的可靠连接与快速分离。养殖周期内未出现脱扣与滑移现象,有效解决了传统短苗绳依赖人工拖拽导致的采收效率低下问题,为连续机械化作业奠定了基础。

(2) 研发了海带连续高效机械化采收设备

基于模块化设计理念,开展了海带连续采收设备的研发工作。所设计的海带捋切刀具,通过结构化设

计增强了刀具的结构强度,有效避免了在突发情况下出现损坏的问题。通过对内外刀片夹角进行优化,将苗绳允许垂荡角度提升至 55° ,相较于初代提升了 30° ,从而消除了苗绳被刀具切割的潜在风险;与此同时,设计了配套设计的伞辐状苗绳收纳装置,能够实现300 m长苗绳的自动有序收纳,大幅降低了该环节的时间成本与劳动强度。

(3) 系统作业性能达到产业化应用水平

海上综合试验结果表明,在采收线速度 $9.36\sim 14.82\text{ m/min}$ 的作业参数范围内,该系统海带采净率为100%,苗绳未出现损伤和断裂,单台筏架采收时间为 $27\sim 36\text{ min}$,人均采收效率达 $1.86\text{ t/(h}\cdot\text{人)}$,是传统人工模式的 $2.09\sim 2.78$ 倍。整个系统仅需4人操作(平台采收3人,辅助解扣1人),无需重体力劳动,显示出良好的经济性。该系统实现了从苗绳分离、捋切采收到苗绳收纳的全流程连续自动化作业,有效解决了现有采收设备存在的筏架适应性不足与损伤率偏高两大技术瓶颈。

综上,本研究构建了宜机化养殖模式和连续采收设备,成功构建了一套高效、稳定的海带连续采收系统与装备。为我国海带养殖的机械化升级与规模化推广提供了切实可行的装备支撑,具有显著的经济与社会效益。后续研究可重点关注平台在复杂海况下的动态响应优化,并拓展系统对不同海况下、不同筏式品种及养殖模式的适应性,以进一步提升其综合应用潜力。

参 考 文 献

- 常宗瑜, 张扬, 郑中强, 等. 筏式养殖海带收获装置的发展现状. 渔业现代化, 2018, 45(1): 40-48 [CHANG Z Y, ZHANG Y, ZHENG Z Q, *et al.* Development status of the raft-cultivation harvesting devices for kelp. Fishery Modernization, 2018, 45(1): 40-48]
- 樊星, 魏皓, 原野, 等. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 181-186, 192 [FAN X, WEI H, YUAN Y, *et al.* The features of vertical structures of tidal current in a typical coastal mariculture area of China. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 181-186, 192]
- 郭隐彪, 王春锦, 郑茂江, 等. 一种海带的收取装置: CN202406538U. 2012-09-05 [GUO Y B, WANG C J, ZHENG M J, *et al.* A kelp harvesting device: CN202406538U. 2012-09-05]
- 刘涛. 海带养殖技术. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2019 [LIU T. *Laminaria japonica* culture technology. Qingdao: China Ocean University Press, 2019]
- 刘雅静, 席天乐, 梁成伟, 等. 海洋酸化对藻类生态学效应及作用机制的研究进展. 生态毒理学报, 2024, 19(1): 1-16 [LIU Y J, XI T L, LIANG C W, *et al.* Research progress on ecological effects and mechanism of ocean acidification on algae. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(1): 1-16]
- 罗振兴. 小绞车容绳量、钢丝绳平均运行速度及边缘高度差计算方法. 科技创新与应用, 2012, 2(28): 109 [LUO Z X. Calculation method of rope capacity, average running speed and edge height difference of small winch. Technology Innovation and Application, 2012, 2(28): 109]
- 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2025 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2025 [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2021. Beijing: China Agriculture Press, 2021]
- 孙威, 张继红, 吴文广, 等. 基于生命周期法的养殖海带的碳足迹评估. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 16-23 [SUN W, ZHANG J H, WU W G, *et al.* Carbon footprint assessment of cultured kelp based on life cycle assessment. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 16-23]
- 田月, 肖宜华, 邵伟, 等. 不同海带养殖阶段桑沟湾沉积物有机碳来源与组分特征研究. 环境科学学报, 2025, 45(8): 244-254 [TIAN Y, XIAO Y H, SHAO W, *et al.* The sources and compositional changes of organic carbon in sediments of Sanggou Bay at different stages of kelp culture. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(8): 244-254]
- 吴忠迅. 烟台市长岛海带产业发展存在问题与发展建议. 农业工程技术, 2024, 44(30): 24-25 [WU Z X. Problems in the development of kelp industry in Changdao, Yantai and corresponding development suggestions. Agricultural Engineering Technology, 2024, 44(30): 24-25]
- 徐国胜, 李杰. 3Cr13 不锈钢精车切削表面粗糙度研究. 工程机械, 2019, 50(12): 66-72, 8-9 [XU G S, LI J. Research on fine cutting surface roughness of 3Cr13 stainless. Construction Machinery and Equipment, 2019, 50(12): 66-72, 8-9]
- 严瑾, 房景辉, 王仁杰, 等. 桑沟湾海带单绳式养殖模式的初步研究. 中国水产科学, 2024, 31(10): 1230-1239 [YAN J, FANG J H, WANG R J, *et al.* Preliminary study on the single rope aquaculture mode of *Saccharina japonica* in the Sanggou Bay. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(10): 1230-1239]
- 闫令东. 筏式养殖夹苗密度对海带生长的影响——以荣成爱莲湾海带养殖为例. 烟台大学硕士研究生学位论文, 2021 [YAN L D. Effects of Clamping Density on the growth of *Saccharina japonica* in raft culture: A case study in Ailian Bay. Master's Thesis of Yantai University, 2021]
- 周小燕, 倪琦, 徐皓, 等. 2021 年中国水产养殖全程机械化发展报告. 中国农机化学报, 2022, 43(12): 1-4 [ZHOU X Y, NI Q, XU H, *et al.* Development report of China aquaculture whole-process mechanization in 2021. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(12): 1-4]

- EBINA SUISAN. Delivering the blessings of Rishiri to the world, 2023. <https://ebinasuisan.com/>
- FLAVIN K, FLAVIN N, FLAHLIVE B. Kelp farming manual a guide to the processes, techniques, and equipment for farming kelp in New England Waters. Portland, ME: Ocean Approved, 2013
- HWANG E K, HWANG M S, LEE S Y, *et al.* Cultivation of *Ecklonia stolonifera*. 1101 Okam-dong, Mokpo-si, Jeollanam-do: National Institute of Fisheries Science, Algae Bio-Research Center, 2010
- HWANG E K, PARK E J, YOO H I, *et al.* Cultivation of *Undariopsis peterseniana*. 130 Tongil-daero, Mokpo-si, Jeollanam-do: National Institute of Fisheries Science, Algae Research Center, 2016
- JIANG T, HONG Y, LU L F, *et al.* Design and experiment of a new mode of mechanized harvesting of raft cultured kelp. *Aquacultural Engineering*, 2022, 99: 102289
- PARK M W. Wando Sea, a paradise for seaweed. Kelp harvest in full swing. 2015-05-22. <http://www.gjdaily.net/news/articleView.html?idxno=15181>
- Seaweed Solutions AS. Seaweed Solutions industrial-scale offshore seaweed cultivation. *Harvest Techniques*, 2022. <https://businessnorway.com/solutions/seaweed-solutions-industrial-scale-offshore-seaweed-cultivation>
- Shigemo Fisheries Cooperative Association, Revive the coast with the spirit of “Tenkei Kaikyō” (Gratitude for divine blessings and restraint from arrogance)! 2020, <https://hama-p.jp/column/14897>
- TAN Y M, LOU S Y, CHEN Z X. Research on integrated specialized ship for kelp harvesting, classifying and grading. *Aquacultural Engineering*, 2020, 91: 102121
- WANG X, WANG Y N, LI Z Z, *et al.* Research on the three-body kelp harvesting ship based on floating raft aquaculture mode. *Aquacultural Engineering*, 2025, 110: 102545
- WANG Y N, ZHA Z H, WANG X, *et al.* Research on the separation technology of kelp and shellfish box based on shellfish-kelp mixed culture mode. *Fishes*, 2024, 9(11): 464
- ZHANG Y, CHANG Z Y, ZHENG Z Q, *et al.* Harvesting machine for kelp culture in floating raft. *Aquacultural Engineering*, 2017, 78: 173–179
- ZHU Y, HONG Y, JIANG T, *et al.* Design and test of an efficient automatic clip seedling system for raft aquaculture kelp. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(12): 2301

(编辑 冯小花)

Optimized Continuous Harvesting System for Long-Rope Kelp

HONG Yang, JIANG Tao^①, CHEN Zhixin, YANG Meng,
ZHU Ye, ZHANG Zhihao, LIN Liqun, LIU Yuanhao

(Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract In China, the annual output of dried kelp is as high as 1.86 million tons; however, the harvesting process still relies heavily on manual labor, leading to low per capita efficiency and high labor intensity. Although foreign mechanized harvesting equipment exists, it is designed for long-line culture modes and is incompatible with the raft-type parallel culture system prevalent in China. The development of domestic semi-mechanized harvesting equipment faces challenges, such as poor raft adaptability and insufficient harvesting continuity, highlighting the need for synergistic innovation in both culture modes and equipment.

To address these issues, we optimized mechanization-adapted culture modes and innovated key equipment components to develop a smaller-scale continuous harvesting system based on long seedling ropes, thus overcoming the efficiency bottleneck of traditional manual harvesting. First, a circuitous series-connected raft system for long seedling ropes was constructed by integrating 300 m continuous seedling ropes with 16 mm-wide quick-release buckles. This series structure preserves traditional

① Corresponding author: JIANG Tao, Email: jiangtao@fmiri.ac.cn

culture density while facilitating reliable connections and rapid separation between the seedling ropes and rafts. Following a modular design approach, the core components (e.g., rectangular guiding devices, inclined conveyors, and low-damage stripping-cutting tools) were integrated with a hydraulic centralized control system, enabling single-person operation of continuous mechanized harvesting equipment.

The stripping-cutting tool structure was innovatively optimized, with an outer blade diameter of 120 mm and inner blade diameter of 45 mm, and the allowable heave angle of the seedling ropes was increased to 55°. Dynamic simulation analysis using Ansys LS-DYNA software for emergency scenarios (e.g., hanging rope entanglement) revealed that the maximum equivalent stress was 405.04 MPa, far below the yield strength of the material, confirming structural strength reliability. Coupled with an umbrella-spoke-shaped seedling rope storage device (300 m capacity), stable and continuous mechanized harvesting of the entire raft was achieved.

Trials of the equipment at a kelp harvesting site demonstrated that at a harvesting line speed of 9.36–14.82 m/min, the system achieved 100% kelp-harvesting completeness with no seedling rope breakage. Single-raft harvesting time ranged from 27–36 min, and the per capita harvesting rate reached 2 t/(h·person), twice that of traditional manual labor. Only four workers are required to complete the entire process without heavy physical labor, addressing the issues of frequent start–stops and high manual assistance intensity associated with traditional equipment. The system enables integrated operations such as seedling rope separation, continuous dragging, stripping-cutting harvesting, and seedling rope storage.

The novel harvesting system proposed in this study addresses the technical bottlenecks of poor raft adaptability and low harvesting continuity by establishing a collaborative solution for mechanization-adapted culture modes and equipment. The modular design accommodates operational needs across different scenarios, and the doubled efficiency effectively alleviates labor shortage pressures, providing equipment support for the large-scale promotion of mechanized harvesting in China's major kelp-producing regions. Beyond the kelp industry, the modular design concept and low-damage harvesting technology offer references for the mechanized harvesting of other large algae, contributing to the intelligent upgrading of marine aquaculture equipment.

Key words Kelp; Mechanized harvesting; Long seedling rope rafts; Raft culture