doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.007

链齿-犁式浅海底播菲律宾蛤仔采收机设计与试验

吴　昊[1,2]　张国琛[1,2]　李航企[1,2]　李秀辰[2]　周宇超[3]　母　刚[2]
(1.沈阳农业大学工程学院,沈阳 110866;2.大连海洋大学机械与动力工程学院,大连 116023;
3.通用技术集团大连机床有限责任公司,大连 116100)

摘要:目前浅海菲律宾蛤仔采收存在挖掘阻力大、蛤仔破碎率高等问题,为此提出了一种链齿-犁协同采收方案,设计了适用于浅海蛤仔采收作业的链齿采收机构与减阻松土犁,对采收链齿进行了运动分析与受力分析,根据水平直元线法设计了犁体曲面;进行了减阻松土犁和协同采收作业过程离散元仿真研究,采用单因素试验与 Box-Behnken 试验优化减阻松土犁的幅宽、切土角与安装角,并进行了链齿-犁协同采收仿真试验,结果显示:当减阻松土犁幅宽为 192 mm、安装角为 37.81°、切土角为 25.84°时,犁体阻力最小,为 37.81 N,当犁齿间距离为 30.6 cm、链齿间距为 33.96 mm、犁体入土深度为 30 mm 时,链齿挖掘阻力最小,为 420.57 N,采收率为 88.43%。根据仿真得到的最优参数,加工了链齿-犁式蛤仔采收机,进行了采收试验,并与链齿式蛤仔采收机进行了对比。与链齿式采收机相比,链齿-犁式采收机挖掘阻力降低了 55.35%,采收率提高了 23.7%,含砂率降低了 28.45%,破损率降低了 25.58%。链齿-犁式采收机提高了蛤仔采收效率,降低了采收挖掘阻力,减小了贝类含砂率与破碎率。

关键词:浅海底播养殖;菲律宾蛤仔;链齿-犁式协同采收机;离散元仿真;参数优化
中图分类号:S972.69+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0071-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Chain Tooth-plow Subtidal Bottom-sown Manila Clam Harvester

WU Hao[1,2]　ZHANG Guochen[1,2]　LI Hangqi[1,2]　LI Xiuchen[2]　ZHOU Yuchao[3]　MU Gang[2]
(1. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
2. *School of Mechanical and Power Engineering*, *Dalian Ocean University*, *Dalian* 116023, *China*
3. *General Technology Group Dalian Machine Tool Co.*, *Ltd.*, *Dalian* 116110, *China*)

Abstract: At present, there are problems with high excavation resistance and high breakage rate in the harvesting of shallow sea Manila clams. Therefore, a chain tooth-plow collaborative harvesting scheme was proposed, and a chain tooth harvesting mechanism and a drag reducing loosening plow suitable for shallow sea clam harvesting operations were designed. The motion and force analysis of the harvesting chain teeth were carried out, and the plow body surface was designed based on the horizontal straight line method. A discrete element simulation study was conducted on the process of reducing drag and loosening soil plow and collaborative harvesting operations. Single factor experiments and Box - Behnken experiments were used to optimize the width, cutting angle, and installation angle of reducing drag and loosening soil plow. A chain tooth-plow collaborative harvesting simulation experiment was also conducted. The results showed that when the width of the reducing drag and loosening soil plow was 192 mm, the installation angle was 37.81°, and the cutting angle was 25.84°, the plow body resistance was the smallest, which was 37.81 N. When the distance between plow teeth was 30.6 cm, the distance between chain teeth was 33.96 mm, and the plow depth was 30 mm, the excavation resistance of the chain teeth was the smallest, which was 420.57 N, and the harvesting rate was 88.43%. Based on the optimal parameters obtained from simulation, a chain tooth-plow collaborative clam harvesting machine

收稿日期:2025-07-28　修回日期:2025-08-17
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2400800)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJ232410158048)、辽宁省本科高校基本科研业务费项目(2024JBPTZ002)和大连市科技创新基金计划项目(2024JJ13GX039)
作者简介:吴昊(1996—),男,博士生,主要从事浅海贝类采收装备研究,E-mail:hao_wu111@163.com
通信作者:母刚(1982—),男,正高级实验师,主要从事现代渔业设施装备研究,E-mail:mugang@dlou.edu.cn

was processed, and harvesting experiments were conducted. Compared with the chain toothed harvesting machine, the chain tooth-plow collaborative harvesting equipment reduced excavation resistance by 55.35%, increased recovery rate by 23.7%, reduced sand content by 28.45%, and reduced damage rate by 25.58%. The chain tooth-plow collaborative harvesting equipment improved the efficiency of clam harvesting, reduced excavation resistance, and decreased the sand content and crushing rate of shellfish.

Key words: shallow sea bottom-sown aquaculture; Manila clam; chain tooth plow collaborative harvester; discrete element simulation; parameter optimization

0 引言

2023 年我国海水养殖面积达 2.21×10^6 km^2，贝类养殖面积为 1.36×10^6 km^2，占海水养殖面积的一半以上。浅海底播养殖在贝类养殖中占据主要地位，2023 年我国蛤仔养殖面积为 4×10^5 km^2，养殖产量高达 4.45×10^6 t[1]。菲律宾蛤仔（*Ruditapes philippinarum*）简称蛤仔，是我国浅海底播养殖的主要品种[2]，2023 年产量超过 4.37×10^6 t，是单种产量最高的贝类。蛤仔能利用其发达斧足挖掘泥沙潜沙，通常埋栖深度 30 ~ 80 mm，冬季最深可达 150 mm[3]。采收是蛤仔增养殖过程中的重要环节，对蛤仔产量及品质有显著影响。

目前我国浅海养殖蛤仔采收方式以高压水力采收和潜桨式采收为主，水力采收是利用高压水射流将底质中的蛤仔冲刷进采收网具中[4-6]，潜桨式采收机是以电机或液压马达带动螺旋桨将底质中的蛤仔吹到后方收集网中[7-8]。2 种采收方式作业时会激起大量泥沙，导致蛤仔呛沙、沉积物悬浮漂移等问题[9-11]，引起浅海养殖区底质趋薄、硬化，有机质流失[12-14]，影响蛤仔养殖产业的可持续发展。

针对上述问题，国内外学者设计了多种机械式浅海贝类采收机。OLAKOLU[15] 设计了一种拖耙式采收机，通过耙齿贯入海底底质 8 ~ 10 cm 处深挖掘贝类，其耙齿容易造成贝类破碎且选择性较差。COLLIER 等[16] 设计了一种旋齿式采收机，其采收机构含 2 个 1.2 m 宽的链齿机构：第一链齿的耙齿逆向挖掘贝类，第二链齿耙齿正向旋转收集。MASCILONGO 等[17] 设计的振动采收机其底部安装振动筛板，通过振动减小贝类受力并对挖掘出的贝类进行去泥，振动还促使未达标的幼贝从横向栅条中逃逸，其振动筛板使幼贝逃逸率提高 30%，贝壳破损率下降 19%。HOLT 等[18] 设计了一种振动采收机，将固定耙齿改为振动耙齿，通过振动使底质流化从而减小挖掘阻力。母刚[19] 设计了一种拖曳弹齿式蛤仔采收机，其链齿采收机构采用弹性齿，减小耙齿对蛤仔的冲击力，挖掘后链齿机构可将蛤仔持续输送至采收机网具中，含砂率较潜桨式采收机下降了 83.3%，实现了蛤仔高效低损采收。以上机械式贝类采收机虽然解决了水力式采收机存在的蛤仔呛沙与生态破坏等问题，但仍然存在耙齿阻力大、贝类破碎率高等问题。

基于上述问题，本文针对浅海底播养殖蛤仔机械化采收技术需求，结合蛤仔浅海养殖环境，设计一种链齿-犁式协同浅海贝类采收机。通过链齿运动学分析和受力分析设计链齿式采收机构，根据水平直元线法设计减阻松土犁犁体曲面，通过理论分析确定采收链齿与减阻松土犁参数范围；利用 EDEM 离散元仿真，通过单因素试验与 Box - Behnken 试验探究犁体参数对采收效果的影响；开展链齿-犁式协同采收仿真试验，确定采收机最佳作业参数，试制采收样机进行采收试验，验证设计效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

链齿-犁式浅海蛤仔采收机主要由减阻松土犁、链齿、传动链、减速器、防水电机、滑橇、机架等组成，如图 1 所示。该技术采用犁体软化底质技术与链齿挖掘蛤仔技术相结合，模拟人工耙收作业方式，利用旋转链齿贯入养殖底质进行蛤仔挖掘采收。

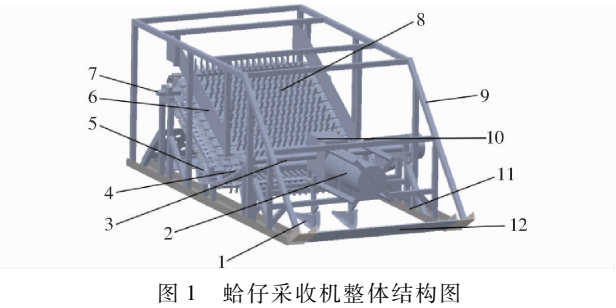


图 1 蛤仔采收机整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of clam harvester

1. 减阻松土犁 2. 防水电机 3. 电机输出轴 4. 链轮 5. 采收轴 6. 侧方挡板 7. 采收从动轴 8. 采收链齿 9. 机架 10. 减速器 11. 滑橇 12. 护板

1.2 工作原理

采收机作业时由渔船从甲板上吊装放入 10 ~ 15 m 水深的海底，由渔船拖曳并为采收机提供电源从而进行采收作业。贝类采收作业时，减阻松土犁贯入底质约 30 mm，可使底质软化，减小后部链齿挖

掘阻力，然后利用旋转链齿再贯入浅海底质梯级减阻挖掘，协同下潜至海底后，采收机由作业船拖曳逆海流方向行进，防水电机开启并驱动链齿沿行进方向逆时针旋转，挖掘采收底质中的蛤仔并将其输送至采收机尾部的网具中。采收一定时间后采收机被提升至海面，网具中的蛤仔被海水反复涮洗，洗净后提升采收机至船甲板上倾卸蛤仔，完成一次采收作业。

2　理论分析和部件优化设计

2.1　采收链齿运动分析

根据采收装置的工作原理，采收链齿是随着链条移动而进行挖掘，挖掘过程运动轨迹是直线运动与圆周运动的合运动。如图 2 所示，当链条使采收链齿Ⅰ直线向左移动至点 A 时，随着链条与链轮啮合，其运动由斜向下运动变为水平与旋转运动，运动轨迹由直线变为摆线。当链齿从底质脱离后，它们以斜向上的直线运动上升，直至达到后驱动轮，然后开始进行圆周运动。由于蛤仔的收集挖掘由图 2 所示的实线轨迹决定，所以只对这一运动的部分进行分析。前齿Ⅰ开始以直线运动，到达点 A 后进入蛤仔埋栖区域，开始采收底质中的蛤仔，经过最低点后继续向左运动，超过点 F 后脱离底质。采收链齿的挖掘深度为 H_d，齿Ⅱ与前排齿运动挖掘阻力相同，只是与底质接触点被标记为点 D，图中阴影区域 GDF 为齿Ⅱ挖掘部分。

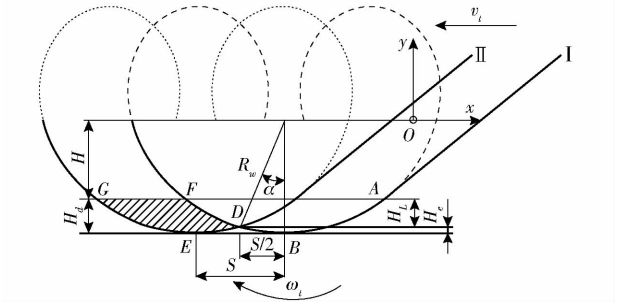


图 2　采收链齿运动轨迹图

Fig. 2　Movement trajectory diagram of dredging teeth

在采收作业时，采收链齿的运动可视为绕点 O 旋转运动和平移运动相结合[20]，其接触到底质时 x 方向和 y 方向的运动学模型可表达为

$$x = -v_t t - R_w \cos\alpha = -v_t t - R_w \cos(\omega_t t) \tag{1}$$

$$y = R_w \sin\alpha = R_w \sin(\omega_t t) \tag{2}$$

式中　v_t——采收机行进速度，m/s

R_w——采收链齿回转半径，mm

ω_t——旋转角速度，rad/s

α——耙齿转角，(°)

t——时间，s

水平行进方向和垂直海底方向的位移与时间关系为

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -v_t + R_w \omega_t \sin(\omega_t t) \tag{3}$$

$$v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R_w \omega_t \cos(\omega_t t) \tag{4}$$

式中　v_x——耙齿水平方向分速度，m/s

v_y——耙齿垂直海底方向分速度，m/s

采收链齿顶端的瞬时速度为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_t^2 + R_w^2 \omega_t^2 - 2 v_t R_w \omega_t \sin(\omega_t t)} \tag{5}$$

运动的速比 λ 为

$$\lambda = \frac{R_w \omega_t}{v_t} \tag{6}$$

因此采收链齿合速度 v 表示为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_t^2 + R_w^2 \omega_t^2 - 2 v_t R_w \omega_t \sin(\omega_t t)} = v_t \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \sin(\omega_t t)} \tag{7}$$

其中

$$v_x = -v_t + R_w \omega_t \sin(\omega_t t) = v_t(-1 + \lambda \sin(\omega_t t)) \tag{8}$$

2.2　采收链齿受力分析

采收链齿在采收过程中逆时针旋转，在采收过程中与底质和蛤仔接触受力情况如图 3 所示。

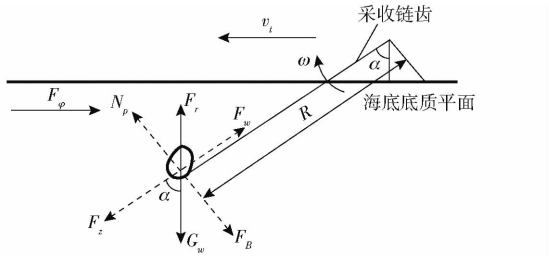


图 3　采收链齿受力分析

Fig. 3　Force analysis of harvesting tooth

采收链齿顶端与底质和蛤仔接触，将蛤仔和底质一起掘出。以采收链齿与底质接触顶端一点为研究对象，其受到的力包括底质蛤仔对采收链齿的压力 G_w，与其相应的支持力 N_p，摩擦力 F_w，海水浮力 F_r，采收链齿旋转所产生的离心力 F_z，科氏力 F_B，以及海水阻力 F_φ。计算式为

$$G_w = m_\alpha g \tag{9}$$

$$F_w = f_\lambda N_p \tag{10}$$

$$F_r = \rho g V \tag{11}$$

$$F_z = m_\alpha R \omega \tag{12}$$

$$F_\varphi = 0.5 C \rho S_c v_r^2 \tag{13}$$

$$F_B = 2 m_\alpha \omega \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

其中

$$v_r = v_t + \omega R \sin\alpha \tag{15}$$

式中　m_α——底质和蛤仔质量，kg

f_λ——蛤仔与耙齿间的摩擦因数

ρ——海水密度,kg/m^3

V——采收链齿对底质和蛤仔排水体积,m^3

R——齿顶圆半径,m

ω——采收链齿角速度,rad/s

C——海水阻力系数

S_c——总体迎水面积,m^2

v_r——总体相对与海水的水平运动速度,m/s

由式(9)~(13)可推导出采收链齿切削挖掘蛤仔时的受力模型为

$$F = m_\alpha g\sin\alpha + 0.5C\rho S_c v_r^2\cos\alpha - \rho gV\sin\alpha \quad (16)$$

2.3 减阻松土犁受力分析

采收作业时,犁体刃切削出的底质沿着犁体曲面向侧后方翻土[21]。考虑到犁体曲面为不规则空间曲面[22],对犁体曲面上各点的作用力进行受力分析。如图 4a 所示,以犁体曲面最前端为基础原点,对犁体曲面上的每一点进行受力分析。

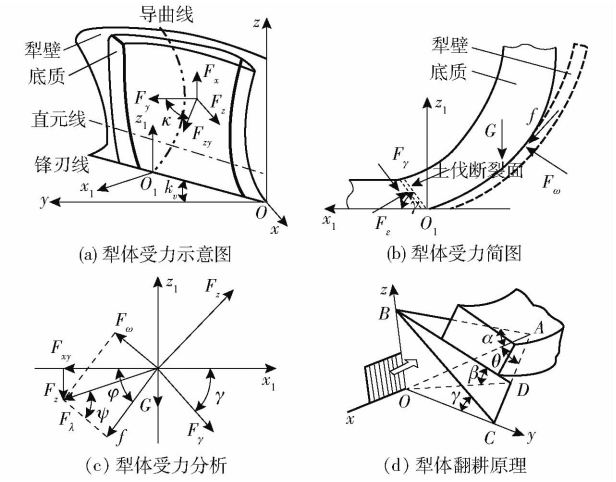


图 4 减阻松土犁受力分析

Fig. 4 Force analysis of drag reducing and loosening plow

以采收的行进方向为 x 轴,以海平面垂直于 x 轴方向为 y 轴,在水平面方向垂直建立空间直角坐标系。在犁体作业期间,底质对犁体曲面的作用力可简化为两两相互垂直的空间力系,即沿 x、y、z 轴方向的力分别为 F_x、F_y、F_z。以犁体曲面为研究对象,其在犁体曲面某点处受到底质的压力 F_ω及摩擦力 f,在犁体曲面对底质翻耕时施加的剪切力和水体阻力为 F_γ及其余未翻耕的底质对曲面的压力 F_ε。由于犁体曲面上各点的法向角和导曲线的曲率都不同,底质对犁体曲面上各点的压力和摩擦力在大小和方向上随着犁体曲面角度的变化而改变。图 4d 中 θ 为犁体的安装角,即犁体与前进方向的夹角。γ 为犁体的切土角,即犁体末端与翻耕后底质所形成的夹角。为了方便分析,以导曲线与犁体线的交点作为原点,以垂直耕宽水平方向为 x_1 轴,垂直水平面方向为 z_1 轴建立平面直角坐标系,如图 4b 所示,犁体受到自身重力 G、犁壁所受压力 F_ω及摩擦力 f,受到未翻耕底质压力 F_ε及剪切力 F_γ相互作用而平衡,受力分析如图 4c 所示,因此根据 x_1z_1 方向受力平衡可知

$$\begin{cases} F_\omega\sin\varphi + f\cos\varphi - F_\gamma\cos\gamma - F_\varepsilon\sin\gamma = 0 \\ F_\omega\cos\varphi + F_\varepsilon\cos\gamma - G - f\sin\varphi - F_\gamma\sin\gamma = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 φ——犁体等效入土角,(°)

设犁体的耕宽为 W_τ,耕深为 Q_θ,水平直元线初始角为 k_0,F_x与 F_y合力为 F_{xy},则有

$$F_\gamma = \frac{W_\tau Q_\theta}{\cos k_0\sin\gamma}\mu \quad (18)$$

$$f = F_\omega\tan\varphi \quad (19)$$

$$F_\lambda = \frac{F_\omega}{\cos\varphi} \quad (20)$$

$$F_{xy} = F_\lambda\sin(\varphi+\psi) \quad (21)$$

$$F_x = F_{xy}\sin k_0 \quad (22)$$

式中 μ——剪切面所受剪切力,N

ψ——犁壁与底质摩擦角,(°)

忽略翻耕后壁面与犁体下方底质对犁体曲面的作用力,则 F_x为犁体的牵引阻力,有

$$F_x = \frac{\sin k_0\sin(\varphi+\psi)(\mu W_\tau Q_\theta + G\sin^2\gamma\cos k_0)}{\sin\gamma\sin(\varphi+\psi+\gamma)\cos k_0} \quad (23)$$

由式(22)可知,犁体的行进阻力与底质性质、犁体结构设计参数和工作参数相关,需要研究犁体作业时的耕深、耕宽、作业速度等参数和决定犁体曲面形状的犁体安装角 θ、犁体切土角 γ 等结构参数对犁体作业阻力方面的影响规律,从而为犁体减阻研究提供方向。

2.4 犁体曲面设计

依据农业犁体设计方法,结合浅海底质环境实际情况,利用水平直元线法[23-25]对犁体曲面进行设计。养殖蛤仔的埋栖深度集中在 50~80 mm,为保障犁体翻耕效果且犁体只起到松土减阻作用,避免犁体导致蛤仔破碎,犁体耕深为 30 mm,根据犁体要求宽深比 k 为 1.3[26],因此耕宽为 195 mm。Δb 为预防漏耕的重叠宽度,取 25 mm,胫刃线 AK 高度 $h = b + \Delta h$[27],L 为点 K 与底质壁面的距离,L 取 10 mm[28],H 最高值 h_{max}有

$$h_{max} = \sqrt{a^2 + b^2} \pm \Delta h \quad (24)$$

式中 a——耕深,mm

导曲线犁体起土角 $\varepsilon = 25°$,铧刃下部线长 50 mm,两端点切线夹角 $\delta = 115°$。根据上述设计参数,利用 Solidworks 2020 绘制犁体曲面,如图 5。

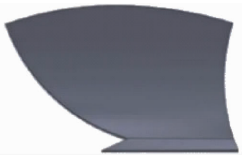


图 5　犁体三维模型

Fig. 5　3D model diagram of plow body

3　仿真试验

3.1　仿真建模与参数设定

运用 Solidworks 对蛤仔采收机进行三维实体建模，缩比导入 EDEM 软件中进行减阻效果评价，利用单因素试验设计，探究犁体耕宽、安装角、切土角对行走阻力的影响；利用 Design-Expert 软件进行分析，以阻力为响应指标，进行三因素 Box－Behnken 试验设计，得到犁体耕宽、安装角、切土角的最佳范围。

蛤仔为凹凸不平的椭球体，采用 GScan 3D 扫描仪对蛤仔的外形进行扫描，利用 Geomagic Wrap 3D 软件进行数据处理，得到蛤仔的三维轮廓，在 EDEM 软件 Bulk Material 模块中根据数据填充不同大小的球体，建模过程如图 6 所示。

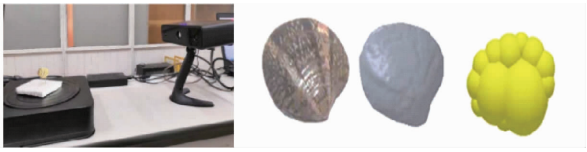


图 6　蛤仔三维扫描与离散元建模

Fig. 6　3D scanning and discrete element modeling of clams

根据底质测量数据可知，该底质为泥质，对底质采用球体形状小颗粒，为提高仿真效率将底质模型同比例放大 10 倍。前期测定的底质和蛤仔材料特性参数如表 1。浅海底质之间的接触模型选择 Herz－Mindlin with Jkr 接触模型。浅海底质与底质之间的表面能为 10.11 J/m^2，而浅海底质与浅海底质、浅海底质与不锈钢、浅海底质与蛤仔之间的接触参数设置如表 2。

表 1　蛤仔与底质仿真材料参数[29]

Tab. 1　Simulation material parameters of clams and substrate

参数	数值
不锈钢泊松比	0.3
不锈钢剪切模量/Pa	7×10^{10}
不锈钢密度/(g·mm^{-3})	7.80
蛤仔泊松比	0.33
蛤仔剪切模量/Pa	5.56×10^{7}
蛤仔密度/(g·mm^{-3})	1.58
底质泊松比	0.30
底质剪切模量/Pa	8.4×10^{7}
底质容重/(g·mm^{-3})	1.66

表 2　仿真模型接触参数[30]

Tab. 2　Contact parameters of simulation model

项目	弹性恢复系数	静滑动摩擦因数	滚动摩擦因数	JKR 表面能/(J·m^{-2})
底质-底质	0.30	0.50	0.30	10.11
底质-不锈钢	0.50	0.83	0.15	0
底质-蛤仔	0.10	0.10	0.30	0
蛤仔-不锈钢	0.38	0.23	0.34	0
蛤仔-蛤仔	0.32	1.25	0.33	0.56

3.2　犁体单因素仿真试验

犁体耕宽、安装角和切土角为影响犁体行进阻力显著因子[31]，采用单因素试验，确定相应指标的因素范围。试验方案与结果如表 3 所示。

表 3　犁体阻力单因素仿真试验方案与结果

Tab. 3　Single factor simulation test plan and results of plow resistance

试验号	切土角/(°)	安装角/(°)	耕宽/mm	阻力/N
1	25.0	40.0	202.5	203.7
2	26.6	40.0	202.5	156.0
3	28.2	40.0	202.5	215.3
4	26.6	35.0	202.5	152.5
5	26.6	38.3	202.5	165.0
6	26.6	41.6	202.5	219.6
7	26.6	38.3	171.0	138.1
8	26.6	38.3	192.0	142.3
9	26.6	38.3	213.0	154.5

将各犁体曲面模型进行仿真试验，仿真模型如图 7 所示。

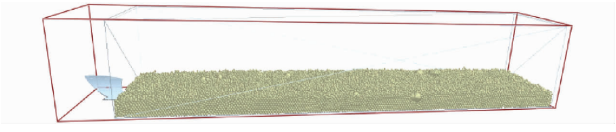


图 7　犁体仿真模型

Fig. 7　Plough simulation model

在犁体安装角度为 40°、耕宽为 202.5 mm 的条件下，探究切土角对犁体行进阻力的影响：行进阻力随着切土角的提高呈先减小后增大趋势，行进阻力最大值和最小值相差 59.3 N。切土角影响犁面对底质的翻耕作用大小，切土角过大、过小都会影响犁体的翻耕效果和行进阻力[32]；在切土角为 26.6°、耕宽为 202.5 mm 的条件下，分析不同安装角对行进阻力的影响。行进阻力随安装角的增大而增大，这与刘元义等[33]研究结果相似，其研究结果表明犁体安装角最小时，行进阻力最小。廖敏等[34]对马铃薯振动挖掘及其减阻进行了研究，建议牵引速度与入土角度都不宜过大。刘进宝等[35]对犁体耕作阻力模型进行了研究，结果表明当切土角和犁体安装角

处于适当的区间时,有利于减小行进阻力;当犁体切土角为 26.6°、犁体安装角为 38.3°时,随着耕宽的增加,行进阻力随之增大,最大值与最小值相差 16.4 N。当犁体耕宽增加时,翻耕松土工作量也随之增加,故行进阻力增加。

3.3 犁体参数仿真试验优化

3.3.1 试验结果与方差分析

根据单因素试验结果,对犁体切土角、安装角和耕宽范围进行了优化,为得到犁体最优参数,以犁体行进阻力为响应值进行仿真,优化犁体切土角、安装角、耕宽,因素编码见表 4。试验方案与结果如表 5 所示,X_1、X_2、X_3为因素编码值。

表 4 犁体仿真试验因素编码

Tab.4 Plow body simulation test factors and coding

编码	因素		
	犁体切土角/(°)	安装角/(°)	耕宽/mm
-1	25.8	35.0	171.0
0	26.6	38.3	181.5
1	27.4	41.6	192.0

表 5 犁体仿真试验方案与结果

Tab.5 Plow body simulation test scheme and results

试验号	因素			行进阻力/N
	X_1	X_2	X_3	
1	0	0	0	46.3
2	0	0	0	46.3
3	-1	-1	0	83.9
4	0	-1	1	39.5
5	-1	0	-1	78.8
6	0	-1	-1	70.4
7	1	-1	0	39.5
8	0	1	1	100.6
9	1	1	0	200.8
10	-1	0	1	41.6
11	1	0	1	100.2
12	0	1	-1	100.3
13	0	0	0	46.3
14	0	0	0	46.3
15	0	0	0	46.3
16	-1	1	0	74.9
17	1	0	-1	92.0

方差分析如表 6 所示。回归模型 $P<0.01$,失拟项 P 值大于 0.05,表明回归模型准确,拟合度较好;校正决定系数 R^2_{Adj}为 0.957 5,表明犁体耕宽、安装角、切土角这 3 个因素对犁体行进阻力的影响达到 95.75%;X_1、X_2对行进阻力影响极显著,X_3对行进阻力影响显著;X_1X_2对行进阻力影响极显著,X_1X_3对行进阻力影响显著;X_1^2、X_2^2对犁体行进阻力影响极显著。

表 6 犁体仿真试验方差分析

Tab.6 Variance analysis of plow body simulation test

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	25 406.73	9	41.02	<0.001 **
X_1	2 937.61	1	42.68	0.003 **
X_2	7 399.36	1	107.51	<0.001 **
X_3	444.02	1	6.45	0.038 7 *
X_1X_2	7 250.52	1	105.34	<0.001 **
X_1X_3	515.29	1	7.49	0.029 1 *
X_2X_3	243.36	1	3.54	0.102 1
X_1^2	3 060.96	1	44.47	0.000 3 **
X_2^2	2 959.63	1	43.00	0.000 3 **
X_3^2	100.58	1	1.46	0.266 0
残差	481.79	7		
失拟项	481.79	3		
误差	0	4		
总和	25 888.52	16		

注:* 表示影响显著($0.01<P<0.05$),** 表示影响极显著($P\leqslant0.01$),下同。

根据表 6,对行进阻力进行回归拟合分析,得到回归方程

$$F=46.30+19.16X_1+30.41X_2-7.45X_3+42.57X_1X_2+11.35X_1X_3+7.8X_2X_3+26.96X_1^2+26.51X_2^2+4.89X_3^2 \tag{25}$$

3.3.2 响应面分析

方差分析结果显示,X_1X_2与 X_1X_3对行进阻力影响显著,利用响应面分析交互作用对阻力的影响,结果如图 8 所示。

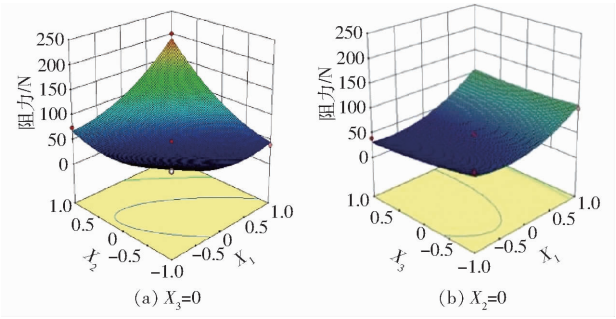


图 8 犁体行进阻力的响应曲面

Fig.8 Response surfaces of plow body travel resistance

如图 8a 所示,耕宽固定为 181.5 mm,分析犁体切土角与安装角交互作用对阻力的影响,犁体行进阻力随切土角的增大而增大,当切土角较小时,底质主要发生拉伸破坏,随着切土角的增大,底质破坏形式变为剪切破坏,底质抗剪强度远高于抗拉强度,故犁体行进阻力增大;犁体行进阻力随安装角的增大呈现先减小后增大的趋势,当安装角较小时,随着安装角增大,切削方向接近底质自然断裂面,底质沿犁体曲面的滑动流畅,剪切破裂所需能量降低,阻力减小。安装角过大时,底质被向前挤压而非侧向翻转,导致底质堆积在犁体前方,阻力增加。

图 8b 为安装角固定为 38.3°，犁体切土角与耕宽交互作用对阻力的影响，阻力随犁体切土角和耕宽的增大明显增加。耕宽增大时，阻力的增幅更大，犁体切土角相同时，耕宽为 192 mm 时的行进阻力是 171 mm 时的 2 倍。相对而言，犁体切土角对阻力的影响较小，犁体切土角最大时的阻力约为最小时的 1.2 倍。耕宽增大直接扩大犁体与底质的接触面积，摩擦阻力与扰动土壤体积增大，犁体阻力显著上升。

利用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块，将行进阻力目标设为最小值，计算后得出的最优参数为：耕宽 192 mm、犁体安装角 37.81°、切土角 25.84°，此时行进阻力最小，为 37.81 N。

3.4　链齿-犁协同采收仿真试验

为减少仿真时间，将蛤仔采收机三维结构进行简化，如图 9 所示。去除动力单元机构、机架、传动机构等，将链齿-犁式采收机构简化为旋转链齿、减阻松土犁和收集装置。将采收机的采收链齿等机构宽度按照 2∶1的比例进行缩放，以提高仿真效率。

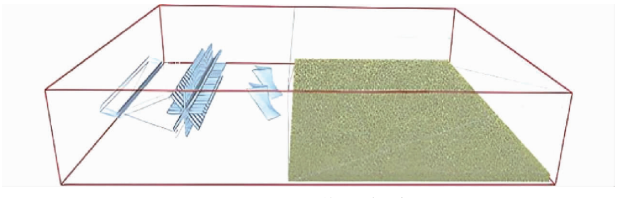


图 9　采收作业仿真

Fig. 9　Dredging operation simulation

在 EDEM 软件中 Analyst 模块 Total Force 界面下，导出采收机构在仿真过程中 X、Y、Z 各方向所需要的挖掘阻力。截取受力平稳时间段内的数据求平均值，得到链齿-犁协同采收机在单位时间内的挖掘阻力 F_t。统计出链齿-犁协同采收机对蛤仔的采收数量，通过与蛤仔颗粒床中蛤仔总数的对比，计算得出采收机构的采收率 η。

3.4.1　试验结果与方差分析

采收链齿间距、犁体入土深度和犁齿距离对采收链齿挖掘阻力和采收率有很大影响，以采收链齿挖掘阻力和采收率为响应值进行仿真，将犁齿距离、采收链齿间距、犁体入土深度进行优化，因素编码见表 7。

表 7　采收仿真试验因素编码

Tab. 7　Dredging simulation test factors and coding

mm

编码	因素		
	犁齿距离	采收链齿间距	犁体入土深度
-1	30	30	30
0	50	45	55
1	70	60	80

依据浅海采收工况，通常蛤仔采收船采收速度为 1 ~ 2 kn[36]，故选取行进速度为 0.77 m/s，采收链齿采收转速为 30 r/min，对每组试验进行仿真，试验结果见表 8，X_4、X_5、X_6 为因素编码值。

表 8　采收仿真试验方案与结果

Tab. 8　Dredging simulation test scheme and results

试验号	因素			挖掘阻力/N	采收率/%
	X_4	X_5	X_6		
1	0	0	0	453.80	85.00
2	0	0	0	453.80	85.00
3	-1	-1	0	424.60	86.50
4	0	-1	1	464.20	79.80
5	-1	0	-1	398.60	81.90
6	0	-1	-1	480.80	88.56
7	1	-1	0	621.00	87.10
8	0	1	1	515.20	79.79
9	1	1	0	598.60	82.10
10	-1	0	1	447.60	80.56
11	1	0	1	576.30	86.73
12	0	1	-1	435.10	75.60
13	0	0	0	453.80	85.00
14	0	0	0	453.80	85.00
15	0	0	0	453.80	85.00
16	-1	1	0	465.70	72.80
17	1	0	-1	533.60	86.02

方差分析如表 9 所示。挖掘阻力回归模型 $P < 0.01$，失拟项 P 值大于 0.05，表明回归模型准确，拟合度较好；挖掘阻力校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.976 3，表明所研究犁齿距离、采收链齿间距、犁体入土深度这 3 个因素对采收链齿挖掘阻力的影响达到 97.63%；X_4、X_6 对挖掘阻力影响极显著；X_4X_5 对挖掘阻力影响显著，X_5X_6、X_4^2、X_5^2 对挖掘阻力影响极显著。

对于采收率来说，回归模型 $P < 0.01$，失拟项 P 值大于 0.05，表明回归模型准确，拟合度较好。采收率校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.951 3，表明所研究犁齿距离、采收链齿间距、犁体入土深度这 3 个因素对蛤仔采收率的影响达到 95.13%。X_4、X_5 对采收率影响极显著；X_4X_5、X_5X_6 对采收率影响极显著；X_5^2 对采收率影响极显著，X_6^2 对采收率影响显著。

对挖掘阻力和采收率进行回归，拟合回归方程为

$$F_t = 453.80 + 74.125X_4 + 3.0X_5 + 19.4X_6 - 15.87X_4X_5 - 1.57X_4X_6 + 24.17X_5X_6 + 44.43X_4^2 + 29.23X_5^2 - 9.21X_6^2 \tag{26}$$

$$\eta = 85 + 2.52X_4 - 3.93X_5 - 0.62X_6 + 2.17X_4X_5 + 0.51X_4X_6 + 3.28X_5X_6 - 0.027X_4^2 - 2.84X_5^2 - 1.17X_6^2 \tag{27}$$

3.4.2　响应面分析

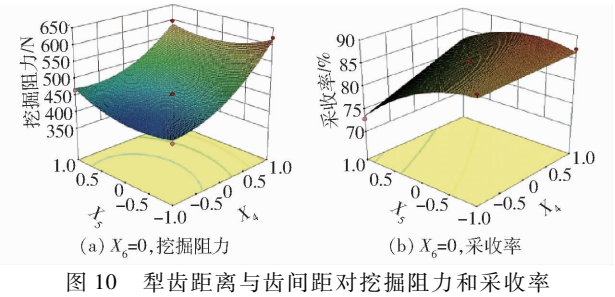
犁齿距离与链齿间距对链齿挖掘阻力的影响如

表 9 采收仿真试验方差分析

Tab. 9 Variance analysis of dredging simulation test

方差来源	采收率 η				挖掘阻力 F_t			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	282.89	9	35.76	<0.000 1 **	63 030.0	9	74.30	<0.000 1 **
X_4	50.95	1	57.98	0.000 1 **	43 956.1	1	466.36	<0.000 1 **
X_5	123.95	1	141.03	<0.000 1 **	72.00	1	0.76	0.411 1
X_6	3.15	1	3.58	0.100 2	3 010.88	1	31.94	0.000 8 **
X_4X_5	18.92	1	21.53	0.002 4 **	1 008.06	1	10.70	0.013 7 *
X_4X_6	1.05	1	1.20	0.310 4	9.92	1	0.11	0.755 1
X_5X_6	43.10	1	49.04	0.000 2 **	2 337.72	1	24.80	0.001 6 **
X_4^2	3.18	1	3.62	0.9537	8 314.49	1	88.21	<0.000 1 **
X_5^2	34.14	1	38.84	0.000 4 **	3 599.29	1	38.19	0.000 5 **
X_6^2	5.76	1	6.56	0.037 5 *	357.35	1	3.79	0.092 6
残差	6.15	7			659.77	7		
失拟项	6.15	3			659.77	3		
误差	0	4			0	4		
总和	289.04	16			63 689.8	16		

图 10a 所示,挖掘阻力随犁齿距离和链齿间距的增大而显著增大。犁齿距离 70 cm 时的挖掘阻力是 30 cm 时的 1.5 倍,链齿间距最大时的链齿挖掘阻力比最小时高约 100 N。犁齿距离增大时,减阻松土犁对底质的流化和松动无法直接作用在链齿采收机构上,导致链齿挖掘阻力增大;链齿间距增大时,单个齿挖掘底质体积增大,且部分底质会在链齿间距中回流,导致链齿挖掘阻力更大。如图 10b 所示,犁齿距离对采收率的影响较小,采收率随链齿间距的增大而大幅降低,由此可见链齿间距是采收率的关键影响因素,链齿间距过大会导致蛤仔的漏采。

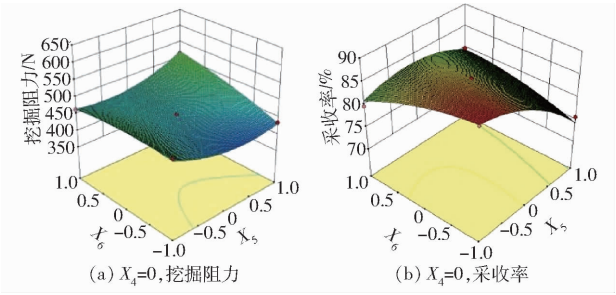


(a) X_6=0,挖掘阻力 (b) X_6=0,采收率

图 10 犁齿距离与齿间距对挖掘阻力和采收率影响响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of plow tooth distance and tooth spacing on tooth resistance and harvesting rate

犁体入土深度和链齿间距对挖掘阻力的影响如图 11a 所示,挖掘阻力随着犁体入土深度的增大先增大后减小,但幅度相对较小。链齿间距对挖掘阻力的影响呈现先减小后增大的趋势,说明挖掘阻力在此区间内有最优值。犁体入土深度和链齿间距对采收率的影响如图 11b 所示,犁体入土深度对采收率影响呈现下降的趋势,但总体变化不大,说明犁体入土深度对采收率影响相对较小。链齿间距对采收率的影响相对较大,随着采收链齿间距的增大,其采收率急剧降低,表明采收链齿间距增大是导致设备漏采的关键因素。



(a) X_4=0,挖掘阻力 (b) X_4=0,采收率

图 11 链齿间距与入土深度对挖掘阻力和采收率影响响应曲面

Fig. 11 Response surface of tooth spacing depth on tooth resistance and harvesting rate

利用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块,将挖掘阻力目标设为最小值,采收率目标为最大值,计算后得出最佳参数为:犁齿距离 30.6 cm,链齿间距 33.96 mm,犁体入土深度 30 mm,此时挖掘阻力为 420.57 N,采收率为 88.43%。通过对犁体行进阻力以及链齿-犁协同采收的挖掘阻力与采收率的仿真研究,求解出犁体最优结构参数与协同作业最优组合,为样机研发提供了数据支持。

4 采收试验

基于浅海底播蛤仔采收设备设计和离散元仿真试验优化结果,制造了链齿-犁协同采收设备样机,如图 12 所示。

4.1 试验方法

采收试验地点位于辽宁省丹东市东港大鹿岛蛤仔养殖区,测试仪器为电机电流过载保护器、ABSOLUTE 数显游标卡尺、EXPLORER 型精密电子



图 12　浅海底播蛤仔链齿-犁式采收设备样机

Fig. 12　Prototype of shallow seabed clam feeding chain toothed plow harvesting equipment

天平、SW009 型水下摄像机、计时器、烧杯、滤纸等。选取采收机挖掘阻力、蛤仔采收率、破碎率、含砂率以及采收效率作为试验指标，指标测试方法见文献[19]。

4.2　结果与分析

链齿-犁式采收机采收试验结果如表 10 所示，对比链齿式采收机[19]，挖掘阻力降低了 55.34%，采收效率提高 1 倍，采收率提高 23.70%、破碎率降低了 25.58%、含砂率降低了 28.45%。减阻松土犁起到底质松动与流化作用，显著降低了链齿的挖掘阻力与贝类破碎率，促进了贝泥分离，提高了采收效率，降低了贝类含砂率。仿真试验蛤仔采收率为 88.43%，采收试验采收率与仿真误差为 3%，误差较小，仿真试验的采收率回归模型可靠性高。挖掘阻力误差较大，原因可能是仿真试验中底质采用单一球体颗粒建模，且离散元仿真忽略水流对挖掘阻力的影响，导致仿真挖掘阻力较小。实际浅海蛤仔采收作业过程中电机功率的波动、水流扰动及蛤仔分布不均等因素导致实际作业挖掘阻力增大。作业海底不平整、船速无法稳定控制，采收机作业过程呈现周期性卡滞-冲击式前进的特征，导致采收机姿态不稳，挖掘阻力波动。

表 10　蛤仔采收机试验结果

Tab. 10　Test results of clam dredger

类型	挖掘阻力/kN	蛤仔采收率/%	蛤仔破碎率/%	蛤仔含砂率/%	采收效率/(kg·h^{-1})
链齿	20.13	69.32	6.45	2.53	1 907.40
链齿-犁	8.99	85.75	4.80	1.81	3 957.60

5　结论

(1)设计了一种浅海底播蛤仔链齿-犁式协同采收机，确定了采收机的结构参数与工作原理，通过理论分析建立了采收链齿的运动学方程和采收链齿的受力方程，对链齿采收机构进行设计。对减阻松土犁体进行了受力分析，明确了影响犁体阻力的关键参数为耕宽、犁体安装角、犁体切土角等，通过水平直元线法设计了犁体曲面。

(2)建立了蛤仔和采收设备的离散元仿真模型，对犁体行进过程和链齿-犁协同采收过程进行了离散元仿真，仿真结果表明：当耕宽为 192 mm、犁体安装角为 37.81°、切土角为 25.84°时，犁体阻力最小，为 37.81 N。对蛤仔链齿-犁协同采收作业参数进行优化，当犁齿距离为 306 mm、齿间距为 33.96 mm、犁体入土深度为 30 mm 时，挖掘阻力最小，为 420.57 N，采收率最高，为 88.43%。

(3)样机采收试验结果表明：链齿-犁式协同采收机较链齿采收机挖掘阻力降低了 55.34%，采收效率提高约 1 倍，采收率提高了 23.70%、破损率降低了 25.58%、含砂率降低了 28.45%。达到了链齿-犁协同采收预期的设计目标，可用于浅海底播蛤仔采收作业。

参　考　文　献

[1]　农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2024.

[2]　代红梅，孙吉东，边陆军，等. 菲律宾蛤仔室内育苗技术探讨[J]. 中国水产，2022，9(3)：93-96.
DAI Hongmei, SUN Jidong, BIAN Lujun, et al. Exploration of indoor seedling technology for Philippine clams [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2022, 9(3): 93-96. (in Chinese)

[3]　王如才，王昭萍. 海水贝类养殖学[M]. 青岛：中国海洋大学出版社，2008.

[4]　ANDREA P, BENT H, MASSIMO V, et al. Dredge selectivity in a Mediterranean striped venus clam (*Chamelea gallina*) fishery [J]. Fisheries Research, 2021, 238: 105895.

[5]　MUNROE D, MORSON J, BORSETTI S, et al. Sampling high biomass but rare benthic animals: methods for surveying commercial clam stocks using a hydraulic dredge [J]. Fisheries Research, 2022, 258: 106538.

[6]　CLARKE L, ESTEVES L, STILLMAN R A, et al. Impacts of a novel shellfishing gear on macrobenthos in a marine protected area: pump-scoop dredging in Poole Harbour, UK [J]. Aquatic Living Resources, 2018, 31: 5.

[7]　母刚，段富海，杨津宇，等. 埋栖贝类采捕机研究进展[J]. 大连海洋大学学报，2020，35(1)：19-30.
MU Gang, DUAN Fuhai, YANG Jinyu, et al. Research progress on burying shellfish harvesters[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(1): 19-30. (in Chinese)

[8]　LIM L P. Apparatus and method for gathering shellfish: AU20170202948[P]. 2017-02-02.

[9]　GASPAR M, LEITAO F, SANTOS M, et al. Size selectivity of the Spisula solida dredge in relation to tooth spacing and mesh

size[J]. Fisheries Research, 2003, 60(2 - 3): 561 - 568.
[10] ELENA G G, STEFÁN Á, HRAFNKELL E. Effects of scallop dredging on macrobenthic communities in west Iceland[J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(3): 434 - 443.
[11] HAUTON C, HALL-SPENCER J M, MOORE P G. An experimental study of the ecological impacts of hydraulic bivalve dredging on maerl [J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60: 381 - 392.
[12] DAYTON P K, THRUSH S F, AGARDY M T, et al. Environmental effects of marine fishing [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2010, 5(3): 205 - 232.
[13] MORELLO E B, FROGLIA C, ATKINSON R J A,et al. Hydraulic dredge discards of the clam (*Chamelea gallina*) fishery in the western Adriatic Sea, Italy[J]. Fisheries Research, 2005, 76(3):430 - 444.
[14] LUCCHETTI A, SALA A. Impact and performance of Mediterranean fishing gear by side-scan sonar technology [J]. Journal Canadien Des Sciences Halieutiques Et Aquatiques, 2012, 69(11): 1806 - 1816.
[15] OLAKOLU S. Bycatch and discards from two types of bivalve dredges targeting *Donax trunculus* and *Chamelea gallina* used in the southern coast of the Marmara Sea, Turkey[J]. Fisheries Science, 2020, 86(6):995 - 1004.
[16] COLLIER J A, MCLAUGHLIN D M. A mechanical oyster harvester for south Carolina estuaries [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2010, 14(1 - 4):295 - 301.
[17] MASCILONGO G, COSTA C, CHATZIEVANGELOU D, et al. Innovative vibrating hydraulic dredge for striped venus (*Chamelea gallina*) fishing[J]. AgriEngineering, 2022, 4: 1 - 16.
[18] HOLT J K , CRESWELL R. Vibratory shellfish harvesters and methods:US19900463474[P]. 1991 - 06 - 02.
[19] 母刚. 蛤仔力学特性测试与采捕机械关键问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
MU Gang. Research on mechanical properties test of clam and key issues of dredge machinery [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
[20] 靳伟,丁幼春,农峰,等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11): 71 - 82.
JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film - soil - straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (11): 71 - 82. (in Chinese)
[21] 王法安,倪畅,张兆国,等. 三七收获机挖掘铲减阻特性分析与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):179 - 190,199.
WANG Fa'an, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Analysis and experiment on drag reduction characteristics of digging shovel of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 (7): 179 - 190,199. (in Chinese)
[22] 张青松. 油菜直播机开沟旋耕降附减阻机理与仿真分析[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
ZHANG Qingsong. Mechanism and simulation analysis of reducing adhesion and drag through trenching and rotary tillage of rapeseed live streaming machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[23] 廖庆喜,张季钦,张青松,等. 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究[J]. 农业机械学报,2024,55(10): 190 - 201.
LIAO Qingxi, ZHANG Jiqin, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 190 - 201. (in Chinese)
[24] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社. 2017.
[25] 吕金庆,刘齐卉,李紫辉,等. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):71 - 82.
LÜ Jinqing, LIU Qihui, LI Zihui, et al. Design and experiment of soil cultivation device of plowshare potato field cultivator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 71 - 82. (in Chinese)
[26] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):16 - 25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHNE Mingdong, et al. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16 - 25. (in Chinese)
[27] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):38 - 46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38 - 46. (in Chinese)
[28] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报,2019,50(8): 59 - 69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59 - 69. (in Chinese)
[29] 刘法伟. 滩涂埋栖贝类振动采捕装备改进及性能试验研究[D]. 大连:大连海洋大学,2023.
LIU Fawei. Research on improvement and performance test of vibration harvesting equipment for buried shellfish in mudflat

[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. (in Chinese)

[30] 李航企,张国琛,刘法伟,等. 基于 DEM - MBD 仿真的滩涂贝类振动采收设备设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):361 - 370.
LI Hangqi, ZHANG Guochen, LIU Fawei, et al. Design and testing of mudflat shellfish vibrating harvester based on DEM - MBD simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 361 - 370. (in Chinese)

[31] 孙妮娜,王晓燕. 秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):15 - 24,87.
SUN Nina, WANG Xiaoyan. Design and experiment of connection device of duplex straw crushing returning and soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 15 - 24, 87. (in Chinese)

[32] 张超,张翼夫,陈金楚,等. 基于田间耕作试验台的犁体耕阻效果仿真及验证[J]. 农机化研究,2023,45(3):182 - 189,196.
ZHANG Chao, ZHANG Yifu, CHEN Jinchu, et al. Simulation and verification of ploughing resistance effect based on field tillage test platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(3): 182 - 189, 196. (in Chinese)

[33] 刘元义,于圣洁,胥备,等. 基于离散元的设施农业就地翻土犁的研究与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(4):1153 - 1165.
LIU Yuanyi, YU Shengjie, XU Bei, et al. Experimental study on in-situ tilling plow in facility agriculture based on discrete element method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(4): 1153 - 1165. (in Chinese)

[34] 廖敏,李金龙,李晓鹏,等. 垂直于切削方向的马铃薯振动挖掘及其减阻研究[J]. 农业开发与装备,2017(8):80 - 82,90.
LIAO Min, LI Jinlong, LI Xiaopeng, et al. Research on potato vibration excavation perpendicular to the cutting direction and its drag reduction[J]. Agricultural Development & Equipments, 2017(8): 80 - 82, 90. (in Chinese)

[35] 刘进宝,郑炫,孟祥金,等. 犁体耕作阻力模型仿真分析与试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(1):264 - 274.
LIU Jinbao, ZHENG Xuan, MENG Xiangjin, et al. Simulated analysis and experimental study on plough tillage resistance model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 264 - 274. (in Chinese)

[36] 赵佳佳,张国琛,吴昊,等. 菲律宾蛤仔浅海养殖底质离散元接触参数标定与仿真[J]. 农业工程学报,2025,41(11):295 - 304.
ZHAO Jiajia, ZHANG Guochen, WU Hao, et al. Calibration and simulation of discrete element contact parameters for subtidal sediments aquaculture of Manila clams[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(11): 295 - 304. (in Chinese)

(上接第 53 页)

[25] CHOLLET F. Xception: deep learning with depthwise separable convolutions[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017.

[26] HENDRYCKS D, GIMPEL K. Gaussian error linear units (GELUs)[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1606.08415, 2016.

[27] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]// International Conference on Machine Learning. PMLR, 2015: 448 - 456.

[28] 裴倩倩,彭双梅,刘旸. 基于深度学习的鱼道内鱼类实时检测[J]. 信息通信,2019(2):67 - 69.
PEI Qianqian, PENG Shuangmei, LIU Yang. Real-time detection of fish in fishway based on deep learning[J]. Information & Communications, 2019(2): 67 - 69. (in Chinese)

[29] KAUR R, SINGH S. A comprehensive review of object detection with deep learning[J]. Digital Signal Processing, 2022, 132: 103812.

[30] ZHU X, HU H, LIN S, et al. Deformable ConvNets v2: more deformable, better results[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 9308 - 9316.

[31] REN J, YU C, MA X, et al. Balanced meta-softmax for long-tailed visual recognition[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020, 33: 4175 - 4186.

[32] CHENG P, TANG X, LIANG W, et al. Tiny - YOLOv7: Tiny object detection model for drone imagery[C]//International Conference on Image and Graphics. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 53 - 65.

[33] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R - CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6): 1137 - 1149.