



菲律宾蛤仔分级称量装置的优化设计及验证

潘澜澜^{1,2,3}, 张馨予^{1,2}, 边策^{1,2}, 张展侨^{1,2}, 郑雨^{1,2},
黄炜雯^{1,2}, 张国琛^{1,2,3*}

(1. 大连海洋大学机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海洋大学, 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心, 辽宁 大连 116023;

3. 大连海洋大学, 设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为解决菲律宾蛤仔分级称量准确率不高, 工序协作度不足等问题。实验以菲律宾蛤仔为研究对象, 研制滚筒筛分级匹配自动称量的菲律宾蛤仔分级称量集成装备。基于离散元仿真对菲律宾蛤仔分级称量过程进行模拟分析, 采用 Design-Expert 软件进行响应曲面分析, 探究滚筒筛转速、滚筒筛倾角及喂料量对分级准确率和称量准确率的影响, 优化整机作业参数, 并进行整机作业验证。结果显示, 各因素对菲律宾蛤仔分级准确率和称量准确率影响的主次顺序为滚筒筛倾角>滚筒筛转速>喂料量, 在滚筒筛转速为 17 r/min、滚筒筛倾角为 3°、喂料量为 200 kg/h 的作业条件下, 装置分级准确率为 96.09%, 称量准确率为 98.79%。完成样机制造及分级称量作业验证, 分级准确率为 96.56%, 称量准确率为 98.16%。研究表明, 在菲律宾蛤仔分级称量过程中, 合理设置滚筒筛的倾角、转速、喂料量等工作参数, 可以实现较高的分级准确率和称量准确率。本研究可为贝类捕后分级称量装置设计提供参考。

关键词: 菲律宾蛤仔; 分级; 称量; 离散元仿真; 分级准确率

中图分类号: S 985.3

文献标志码: A

菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 是我国重要养殖贝类品种, 2023 年我国菲律宾蛤仔的养殖面积已达 4.09×10^5 hm², 较 2022 年增长 0.35%^[1]。菲律宾蛤仔捕捞后需清洗、分级、称量以便鲜销, 但分级设备的准确率、破损率及集成度一直是需要攻克的主要问题。国内外针对贝类分级设备开展了研究^[2-4], 当前机械型贝类分级装置主要包括滚筒式分级机和辊式分级机, 滚筒式分级机分级更准确, 因此应用更为广泛^[5]。日本企业根据贝类外形差异设计了一种双级式滚筒分级机, 贝类分级准确率可达 93%^[6]。当前, 国内贝类捕后处

理技术研究主要集中在单一机械化设备上, 装置集成度不高, 贝类捕后处理的分级后自动化称量集成化需求迫切^[7-9]。国内动态称量设备的准确率较低, 静态称量又过度依赖人工处理, 无法满足市场快速称量的需求^[10]。通过皮带运输^[11]和传感器称量技术^[12]可以实现贝类称量过程的监测控制, 满足贝类分级称量集成作业的需求, 但如何保证分级和称量作业的准确率是装备设计的关键问题。国内外学者利用离散元仿真对散粒物料进行作业动态分析, 通过单因素试验^[13]及分析颗粒在筛分过程中的运动轨迹^[14]和速度情况^[15]等方法, 探究

收稿日期: 2024-08-16 修回日期: 2024-10-21

资助项目: 辽宁省农业农村专项 (2024) 菲律宾蛤仔优良种质资源挖掘与创新; 国家重点研发计划 (2019YFD0900701)

第一作者: 潘澜澜 (照片), 从事渔业装备与节能减排技术研究, E-mail: pllan@dlou.edu.cn

通信作者: 张国琛, 从事水产品加工工艺与装备研究, E-mail: zhangguochen@dlou.edu.cn



设备不同运行参数匹配。

本研究设计一种集成分级、称量为一体的菲律宾蛤仔捕后处理装置, 基于离散元仿真建立菲律宾蛤仔分级称量集成运行参数匹配方法, 以期提升贝类捕后处理装备提供设计方法支撑。

1 材料与方法

1.1 整机结构及工作原理

为了进一步提升菲律宾蛤仔清洗分级称量准确率及工序集成协作度的问题, 实验在前期研究

的菲律宾蛤仔清洗分级机^[16]基础上进行了优化设计。改进后的整机结构包括传送机构(喂料池、传送带、电机)、清洗机构(毛辊刷、喷嘴、水泵)、分级机构(滚筒筛、螺旋叶片)、称量机构(传输带、电机、主从动滚轴、传感器、单片机等)(图1)。工作时菲律宾蛤仔经传送机构传送进入清洗机构, 经毛辊刷和高压喷淋清洗后, 菲律宾蛤仔掉入滚筒筛, 随滚筒筛一起转动筛分, 符合筛孔大小的菲律宾蛤仔通过筛孔落入收料箱中, 当收料箱中的菲律宾蛤仔重量达到预设值时, 推杆电机将收料箱推出, 完成菲律宾蛤仔的分级称量过程。

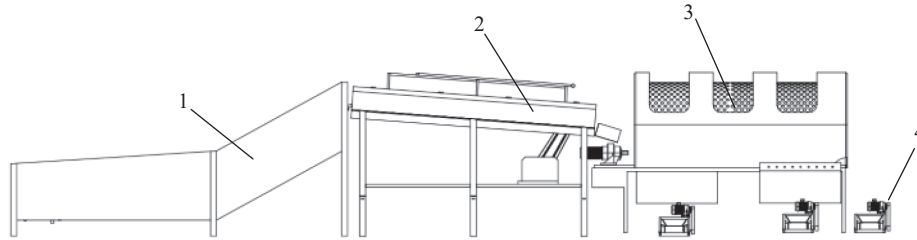


图1 菲律宾蛤仔分级称量装置结构

1. 传送机构, 2. 清洗机构, 3. 分级机构, 4. 称量机构。

Fig. 1 Structure of *R. philippinarum* grading weighing machine

1. transfer mechanism, 2. cleaning mechanism, 3. grading mechanism, 4. weighing mechanism.

1.2 螺旋导向分级机构设计

分级轴向运动分析 菲律宾蛤仔在滚筒筛内的受力分析如图2所示。

分级结构设计 滚筒筛内壁加装单螺旋叶片可以延长菲律宾蛤仔在滚筒筛内部的分级时间, 保证菲律宾蛤仔沿轴线稳定运动^[17], 从而提升滚筒筛的分级准确率(图3)。螺旋叶片直径和螺距根

据公式(1)和(2)计算。

$$D = K \times \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{\varphi \cdot \gamma \cdot \varepsilon}\right)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D 为螺旋叶片直径, m; K 为物料特性参数; Q 为输送量, t/h; γ 为物料容积密度, t/m³; φ 为填充系数; ε 为倾斜输送系数。 K 取值为0.8, φ 取值为0.5, ε 取值为1。

$$S = K \cdot D \quad (2)$$

式中, S 为螺旋叶片螺距, m; D 为螺旋叶片直径, m; K 为物料特性参数。

根据式(2)和(3)确定螺旋叶片外径为796 mm, 螺旋叶片螺距为635 mm。

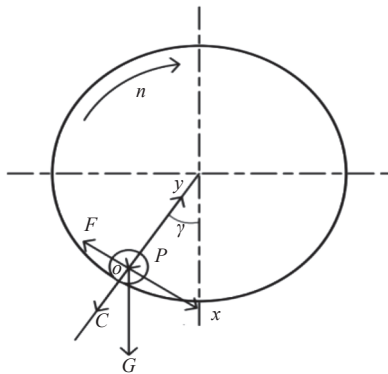


图2 菲律宾蛤仔受力分析

G . 重力, C . 离心力, F . 摩擦力, γ . 位置角, n . 滚筒筛转速。

Fig. 2 Force analysis of *R. philippinarum*

G . gravity, C . centrifugal force, F . friction, γ . position angle, n . roller screen rotation speed.

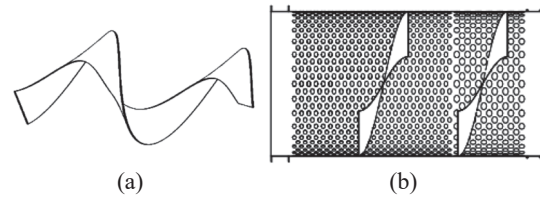


图3 滚筒筛

(a) 螺旋叶片, (b) 滚筒筛。

Fig. 3 Roller screen

(a) screw blade, (b) roller screen.

1.3 称量机构设计

称量机构工作过程 菲律宾蛤仔分级称量机构由电机、传输带、主动滚筒、从动滚筒、前置台组成(图4), 根据菲律宾蛤仔大小分为三级, 分别对应不同尺寸蛤仔的分选口设计3条传输带

和前置台。前置台上放置了推杆电机、称量托盘等称量装置。菲律宾蛤仔经滚筒筛分级后落入分级出料口下方传输带上的收料箱, 重量达到设定值后触发压力传感器和质量感应器, 通过直流电机驱动模块控制推杆电机将收料箱推出。

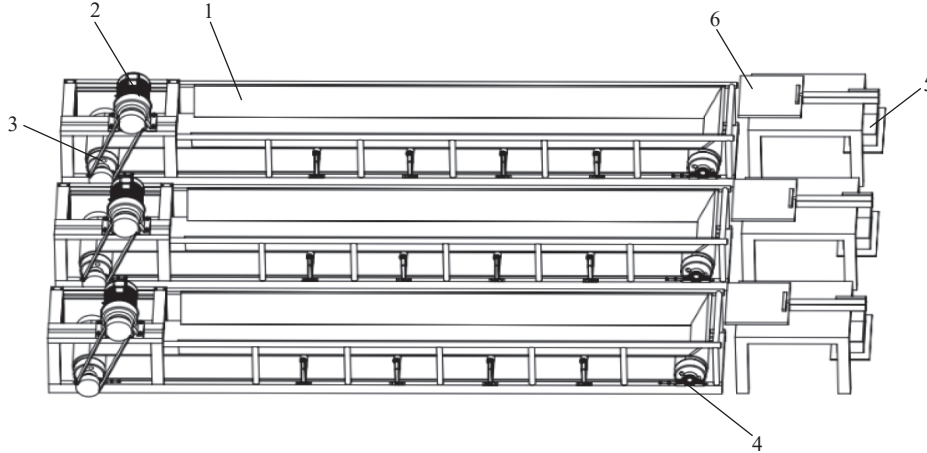


图4 称量装置结构图

1. 传输带, 2. 电机, 3. 主动滚筒, 4. 从动滚筒, 5. 推杆电机, 6. 称量托盘。

Fig. 4 Weighing mechanism structure diagram

1. transmission belt, 2. motor, 3. active roller, 4. driven roller, 5. push rod motor, 6. weighing tray.

根据机械设计手册中滚筒标准直径确定传输带主动滚筒直径 d_1 为 63 mm, 从动滚筒直径 d_2 为 56 mm, 滚筒中心距 a 为 1 200 mm (图5)。其中传输带主滚筒转速 n_1 、功率 P 、从滚筒转速 n_2 、长度 L 根据公式(3)~(6)计算^[11]。从而主滚筒转速 n_1 为 455 r/min, 从滚筒转速 n_2 为 400 r/min, 电机所需功率 P_W 为 88.2 W, 传输带长度 L 为 1 500 mm。根据设备的分级产量和传输带传输时间, 设计收料箱尺寸长为 330 mm、宽为 250 mm、高为 90 mm。

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1\,000} \quad (3)$$

式中, v 为系统运行速度; n_1 为主滚筒转速。

$$d_1 = (1\,100 \sim 1\,300) \sqrt[3]{\frac{P_W}{n_1}} \quad (4)$$

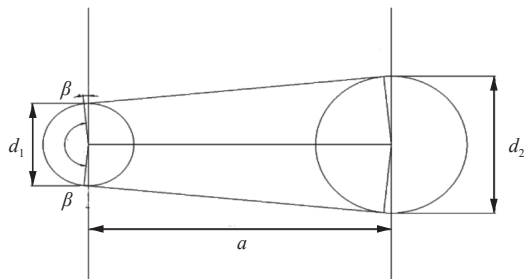


图5 传输带几何图

Fig. 5 Diagram diagram of transmission belt

式中, P_W 为系统所需功率。

$$d_2 = \frac{d_1(1-\varepsilon)}{n_2} \quad (5)$$

式中, n_2 为从滚筒转速; ε 为滑动率, ε 取 0.01。

$$L = 2a + \frac{\pi}{2}(d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a} \quad (6)$$

式中, L 为传送带近似长度。

称量自动化设计 菲律宾蛤仔分级称量装置自动称量硬件部分包括 XTL300 直流推杆电机、可调电源、BCM-H1 压力传感器、BSQ-3 信号转换器、双路隔离直流电机驱动模块、Arduino UNO 单片机, 通过 Arduino 进行软件编写(图6)。称量时, 压力传感器接收到菲律宾蛤仔重量, 发送模拟信号数据至信号转换器, 通过 AD 转换功能将信号数据传输至 Arduino UNO 单片机(图7), 当菲律宾蛤仔重量达到 2.5 kg, Arduino UNO 单片机发送信号至双路隔离直流电机驱动模块, 控制推杆电机将称量托盘推出。

1.4 离散元仿真试验设计

通过 3D 扫描填充建立菲律宾蛤仔离散元模型如图8, 模拟过程中菲律宾蛤仔颗粒模型均采用图8-c, 接触模型采用 Hertz-Mindlin 模型^[18], 设置 3 种不同大小的组合球 (23、28 和 33 mm)。

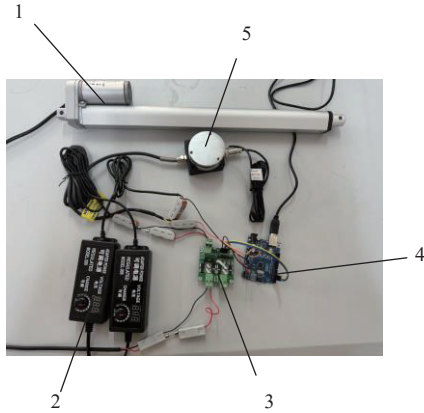


图 6 自动称量系统

1. 推杆电机, 2. 可调电源, 3. 双路隔离直流电机驱动模块, 4. Arduino UNO, 5. 压力传感器。

Fig. 6 Automatic weighing system diagram

1. pushrod motor, 2. adjustable power supply, 3. dual isolated DC motor drive module, 4. Arduino UNO, 5. pressure sensor.

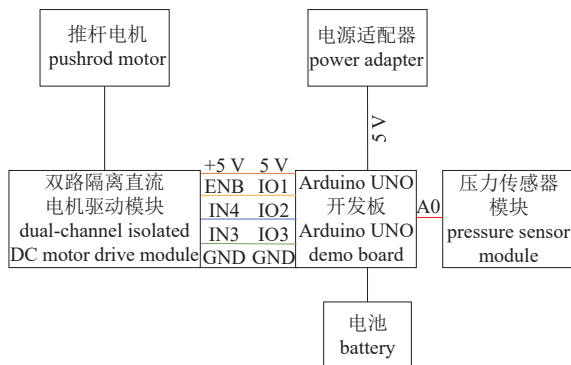


图 7 称量原理图

Fig. 7 Weighing principle diagram

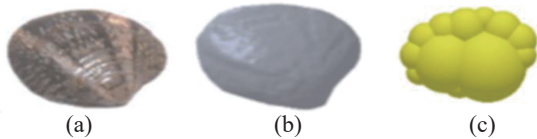


图 8 菲律宾蛤仔颗粒模型

(a) 菲律宾蛤仔, (b) 菲律宾蛤仔 3D 扫描模型, (c) 菲律宾蛤仔填充模型。

Fig. 8 Establishing the *R. philippinarum* pellet model

(a) *R. philippinarum*, (b) 3D scanning model of *R. philippinarum*, (c) filling model of *R. philippinarum*.

为减少计算量, 选取关键部件进行仿真(图 9)。材料相关参数^[19]见表 1, 仿真模型相互接触参数^[19]见表 2。

模拟仿真过程如图 10 所示, 在分析界面内创建 Bin Group 域^[20-21], 总共添加 2 000 个菲律宾蛤仔颗粒模型(图 8-c, 后文简称菲律宾蛤仔), 23

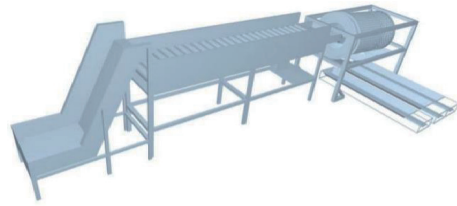


图 9 分级称重装置模型建立

Fig. 9 Establishment of grading weighing machine model

表 1 材料相关参数

Tab. 1 Material related parameters

参数 parameter	数值 numerical value
菲律宾蛤仔密度/(g/mm ³) <i>R. philippinarum</i> spat density	1.58
菲律宾蛤仔泊松比 <i>R. philippinarum</i> Poisson's ratio	0.33
菲律宾蛤仔剪切模量/Pa <i>R. philippinarum</i> shear modulus	5.56×10 ⁷
钢密度/(kg/cm ³) steel spat density	7800
钢泊松比 steel Poisson's ratio	0.3
钢剪切模量/GPa steel shear modulus	79

表 2 材料接触参数

Tab. 2 Material contact parameters

参数 parameter	数值 numerical value
菲律宾蛤仔-筛网(304钢)弹性恢复系数 elastic recovery coefficient between <i>R. philippinarum</i> and screen density (304 steel)	0.32
菲律宾蛤仔-筛网(304钢)动摩擦系数 dynamic friction coefficient between <i>R. philippinarum</i> and screen density (304 steel)	0.34
菲律宾蛤仔-筛网(304钢)静摩擦系数 static friction coefficient between <i>R. philippinarum</i> and screen density (304 steel)	0.23
菲律宾蛤仔-菲律宾蛤仔弹性恢复系数 elastic recovery coefficient between <i>R. philippinarum</i>	0.32
菲律宾蛤仔-菲律宾蛤仔动摩擦系数 dynamic friction coefficient between <i>R. philippinarum</i>	0.33
菲律宾蛤仔-菲律宾蛤仔静摩擦系数 static friction coefficient between <i>R. philippinarum</i>	1.25

mm 菲律宾蛤仔设置为蓝色、28 mm 菲律宾蛤仔设置为绿色、33 mm 菲律宾蛤仔设置为红色, 统计不同收料箱中菲律宾蛤仔的数量, 根据公式 (7) 计算菲律宾蛤仔分级准确率:

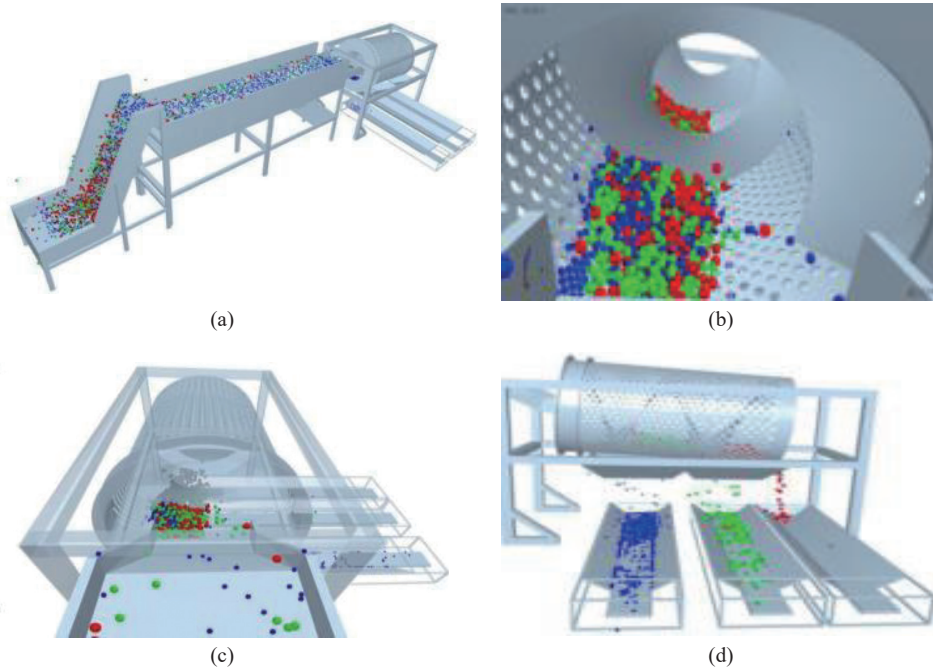


图 10 模拟仿真过程

(a) 菲律宾蛤仔的模拟过程, (b) 菲律宾蛤仔在滚筒筛内的状态, (c) 菲律宾蛤仔下落至滚筒筛的状态, (d) 菲律宾蛤仔从滚筒筛下落的状态。

Fig. 10 Simulation process

(a) simulation process of *R. philippinarum*, (b) state of the *R. philippinarum* in the roller screen, (c) state of *R. philippinarum* drops into roller screen, (d) condition of *R. philippinarum* falling from roller screen.

$$P = \frac{n}{N} \quad (7)$$

式中, P 为分级准确率, %; n 为正确落入目标料斗的总数目, 个; N 为实验总的颗粒数目, 个。

1.5 性能分析

菲律宾蛤仔位移速度 建立 Manual Section, 随机标记 3 个不同尺寸的颗粒 P, 截取其运动轨迹进行分析。

菲律宾蛤仔位移变化轨迹见图 11, 菲律宾蛤仔位移速度随时间变化曲线图见图 12, 在上料阶段和清洗阶段, 菲律宾蛤仔位移速度逐渐增大, 分级时菲律宾蛤仔在滚筒筛内部与壁面和其他菲律宾蛤仔发生碰撞, 位移速度发生剧烈波动, 符合筛孔大小的菲律宾蛤仔在离心力作用下脱离滚筒筛落到收料箱, 与收料箱壁面发生碰撞。伴随其他菲律宾蛤仔下落, 收料箱中的菲律宾蛤仔发生小幅度碰撞。

菲律宾蛤仔旋转速度 菲律宾蛤仔上料时随着传送带传动, 旋转速度不断升高, 进入清洗机构后在毛辊刷的作用下旋转清洗, 此时旋转速度达到最高(图 13)。进入滚筒筛后, 菲律宾蛤仔沿着螺旋叶片向前滚动, 符合筛孔大小后自由下

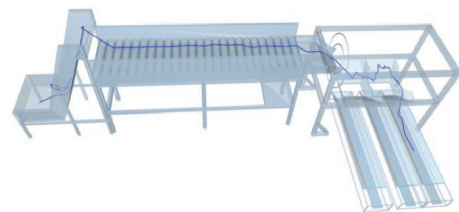


图 11 菲律宾蛤仔位移速度变化运动轨迹

Fig. 11 The trajectory of the *R. philippinarum*'s velocity speed change

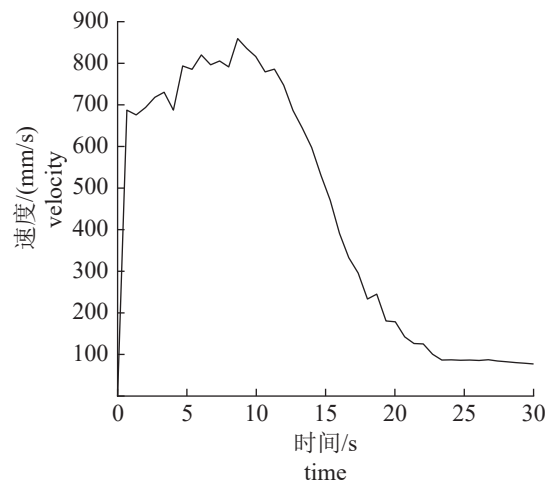


图 12 菲律宾蛤仔位移速度变化曲线

Fig. 12 *R. philippinarum*'s velocity speed change curve

落至收料箱, 分级准确率达到峰值 96.2%。

菲律宾蛤仔受力情况 菲律宾蛤仔从上料机构掉落到清洗机构过程中发生碰撞, 在清洗机中, 菲律宾蛤仔受到毛辊刷的摩擦力向前运动, 在滚筒筛内, 菲律宾蛤仔受螺旋导片引导作用滚动, 受力值达到最高(图 14)。参考整个模拟过程发现, 运行时发生的碰撞并不会对菲律宾蛤仔的质量产生影响。

菲律宾蛤仔落料分析 根据收料箱大小在菲律宾蛤仔落料区域建立 Bin Group, 并划分网格, 统计落入网格内的菲律宾蛤仔数量(图 15)。仿真结果显示, 分级下落的菲律宾蛤仔均能掉落在网格中, 装置的分级和称量准确率较高。

综上, 在清洗分级落料过程中, 虽然菲律宾蛤仔与壁面及其他菲律宾蛤仔发生碰撞, 但能保

证稳定运行, 且分级后能够精准落在称量区域, 集成了菲律宾蛤仔的分级和称量的匹配。

1.6 试验结果与分析

采用三因素三水平响应面优化试验, 以滚筒筛转速 X_1 、滚筒筛倾角 X_2 、喂料量 X_3 为变量, 分级准确率 Y 和称量准确率 b 为响应值, 运用 Design Expert 10.0 软件进行优化试验设计, 拟定 3 种因素的水平范围, 并将 3 个试验因素进行水平编码(表 3), 仿真试验方案结果见表 4。

运用 Design Expert 10.0.3 软件进行多元回归拟合, 得到回归模型方程:

$$Y = 95.87 + 1.58X_1 + 1.96X_2 + 1.21X_3 - 2.56X_2^2 + 0.55X_3^2 - 1.38X_2X_3 - 11.42X_1^2 - 11.75X_2^2 - 11.43X_3^2 \quad (8)$$

对模型进行回归方差分析(表 5), 该模型极显著 ($P < 0.01$), 失拟项不显著 ($P = 0.0917 > 0.05$), 表明模型拟合度较高。根据 P 值看出, 各因素对分级准确率的影响程度为滚筒筛倾角 > 滚筒筛转速 > 喂料量。根据 F 值看出, 滚筒筛倾角和喂料量的交互作用对分级准确率的影响极显著 ($P < 0.01$), 其他因素对分级准确率的影响显著 ($P < 0.05$)。

响应面分析结果显示, 滚筒筛转速与滚筒筛倾角的相互作用对分级准确率有显著影响, 滚筒筛倾角对分级准确率的影响更大(图 16-a)。滚筒

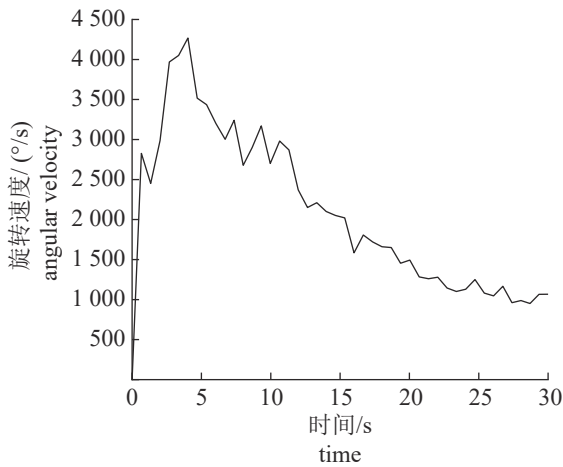


图 13 菲律宾蛤仔旋转速度变化曲线

Fig. 13 *R. philippinarum*'s angular velocity speed change curve

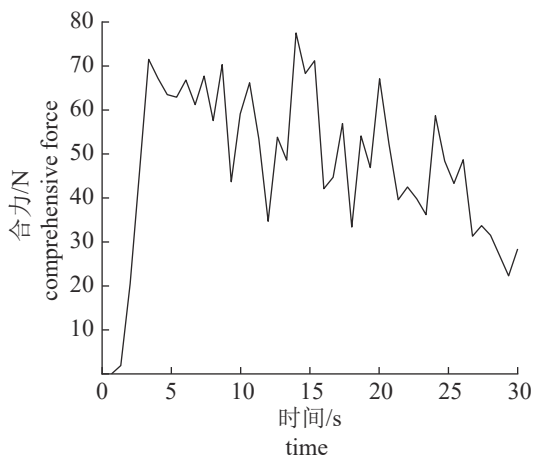


图 14 菲律宾蛤仔受力变化曲线

Fig. 14 Variation curve of *R. philippinarum*

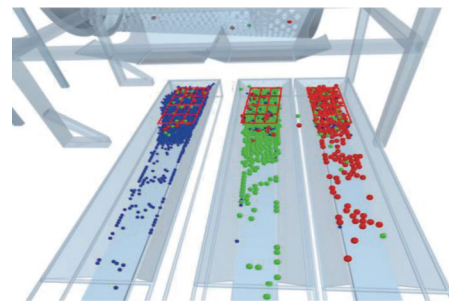


图 15 菲律宾蛤仔分级后落料的仿真结果

Fig. 15 Simulation results of *R. philippinarum* grading

表 3 响应面试验设计因素水平

Tab. 3 Response surface test design factor level table

水平 level	因素 factor		
	滚筒筛转速 X_1 / (r/min) roller screen rotational speed	滚筒筛倾角 X_2 / (°) roller screen tilt angle	喂料量 X_3 / (kg/h) feeding capacity
-1	12	2	150
0	17	3	200
+1	22	4	250

表 4 试验方案及结果

Tab. 4 Test scheme and results

试验序号 test number	X_1	X_2	X_3	Y/%	b/%
1	-1	-1	0	65.92	98.56
2	1	-1	0	74.09	92.16
3	-1	1	0	76.24	91.76
4	1	1	0	80.16	93.46
5	-1	0	-1	77.35	94.29
6	1	0	-1	82.93	94.89
7	-1	0	1	72.68	93.76
8	1	0	1	73.68	92.46
9	0	-1	-1	68.65	91.68
10	0	1	-1	84.85	96.46
11	0	-1	1	69.12	95.59
12	0	1	1	86.32	97.56
13	0	0	0	94.12	96.46
14	0	0	0	95.80	98.79
15	0	0	0	96.26	97.63
16	0	0	0	96.46	95.16
17	0	0	0	96.70	96.33

表 5 响应面模型 ANOVA 分析

Tab. 5 Response surface model ANOVA analysis

来源 source	平方和 sum of squares	自由度 df	均方 mean square	F值 F value	P值 P value	显著性 significance
模型 model	2320.31	14	165.74	48.13	<0.0001	**
X_1	30.02	1	30.02	8.72	0.0105	*
X_2	46.26	1	46.26	13.43	0.0025	**
X_3	17.26	1	17.26	5.01	0.042	*
X_1X_2	26.27	1	26.27	7.63	0.0153	*
X_1X_3	1.2	1	1.2	0.35	0.5646	*
X_2X_3	7.59	1	7.59	2.2	0.1598	**
X_1^2	845.52	1	845.52	245.52	<0.0001	**
X_2^2	895.49	1	895.49	260.03	<0.0001	**
X_3^2	587.99	1	587.99	170.74	<0.0001	**
残差 residual	48.21	14	3.44			
失拟项 lack of fit	43.96	10	4.4	4.14	0.0917	不显著 not significant
纯误差 pure error	4.25	4	1.06			
总和 total	2368.53	28				

$R^2=0.9796$ Adj $R^2=0.9593$

注: “***”为极显著, $P<0.01$, “*”为显著, $P<0.05$ 。

Notes: $P<0.01$ means extremely significant, indicated by “***”, $P<0.05$ means significant, indicated by “*”.

筛转速为 14.5~19.5 r/min、滚筒筛倾角为 2.5~3.5° 时, 装置的分级称量准确率较高。滚筒筛转速对分级准确率的影响更显著, 滚筒筛转速为 14.5~19.5 r/min、喂料量为 175~225 kg/h 时, 装置的分级称量准确率较高 (图 16-b)。滚筒筛倾角对分级准确率的影响大于喂料量, 喂料量为 175~225 kg/h、滚筒筛倾角为 2.5~3.5° 时, 装置的分级称量准确率较高 (图 16-c)。

1.7 参数优化

以最高分级准确率和称量准确率为目标, 目标函数表示为:

$$\max Y_{\text{蛤}}(A, B, C) \quad (9)$$

$$\begin{cases} 12 \text{ r/min} \leq A \leq 22 \text{ r/min} \\ 2^\circ \leq B \leq 4^\circ \\ 150 \text{ kg/h} \leq C \leq 225 \text{ kg/h} \end{cases} \quad (10)$$

式中, A 为滚筒筛转速; B 为滚筒筛倾角; C 为喂料量。得出最优参数组合: 当滚筒筛转速为 17 r/min、滚筒筛倾角为 3°、喂料量为 200 kg/h 条件时, 装置分级准确率为 96.09%、称量准确率为 98.79%, 达到最佳分级称量效果。

2 结果

2.1 材料与仪器

实验材料为 100 kg 不同大小的菲律宾蛤仔。实验仪器包括菲律宾蛤仔分级称量样机 (图 17)、电子秤、电子秒表、流速计、转数计。

以菲律宾蛤仔的分级准确率和称量准确率为指标探究分级称量装置的性能。

$$A = \frac{W_0 - W_1 - W_2}{W_0} \quad (11)$$

式中, A 为分级准确率, %; W_0 为菲律宾蛤仔总重, kg; W_1 为未分级的菲律宾蛤仔总重, kg; W_2 为分级错误的菲律宾蛤仔总重, kg。

$$G = \frac{G_0 - G_1 - G_2}{G_0} \quad (12)$$

式中, G 为称量准确率, %; G_0 为菲律宾蛤仔总重, kg; G_1 为未称量的菲律宾蛤仔总重, kg; G_2 为称量错误的菲律宾蛤仔总重, kg。

2.2 作业验证结果与分析

实验选用 100 kg 不同大小的菲律宾蛤仔, 在工作参数为喂料量 200 kg/h、滚筒筛倾角 3°、滚

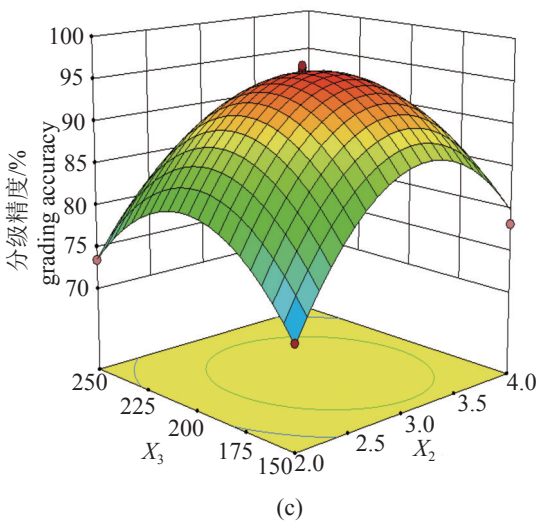
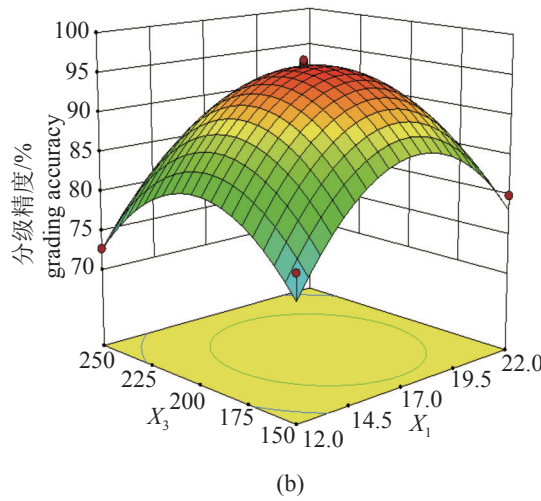
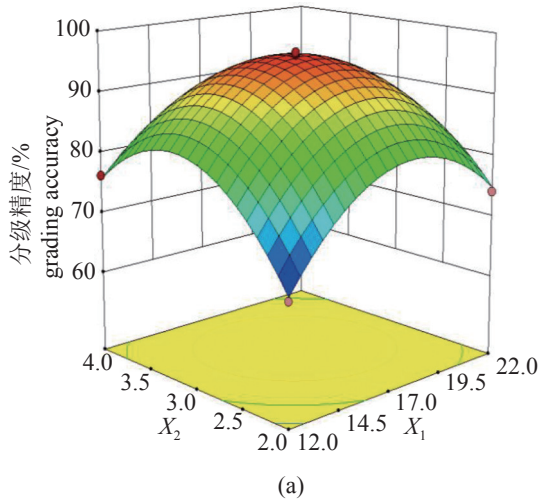


图 16 交互作用响应面分析

(a) 滚筒筛转速与滚筒筛倾角, (b) 滚筒筛转速与喂料量, (c) 滚筒筛倾角与喂料量。

Fig. 16 Reponse surface analysis of interaction

(a) roller screen rotational speed and roller screen tilt angle, (b) roller screen rotational speed and feeding capacity, (c) roller screen tilt angle and feeding capacity.

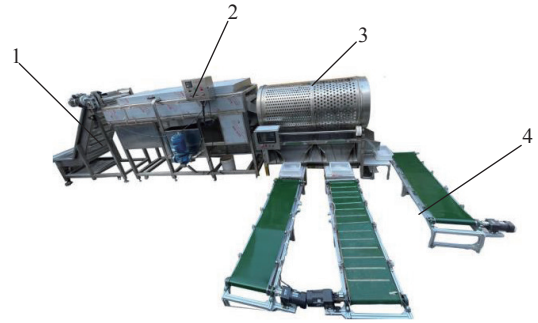


图 17 菲律宾蛤仔分级称量样机

1. 上料机构, 2. 清洗机构, 3. 分级机构, 4. 称量机构。

Fig. 17 *R. philippinarum* grading weighing machine

1. feeding mechanism, 2. cleaning mechanism, 3. grading mechanism, 4. weighing mechanism.

筒筛转速 17 r/min 的条件下进行 3 次分级称量实验^[22], 现场作业见图 18。

作业结果如表 6 所示, 通过 3 次作业得出装置的分级准确率平均值为 96.56%, 称量准确率平均值 98.16%, 本机实现了菲律宾蛤仔的高准确度分级和自动化分级称量。

3 讨论

本研究利用响应曲面设计进行装置结构参数

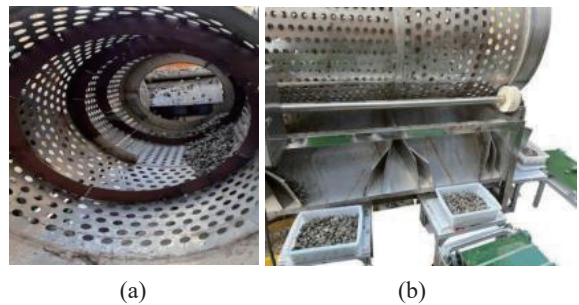


图 18 现场作业

(a) 菲律宾蛤仔在滚筒筛内的分级状态, (b) 菲律宾蛤仔在称量时的状态。

Fig. 18 Field operation

(a) grading state of *R. philippinarum* in the roller screen, (b) condition of *R. philippinarum* at the time of weighing.

表 6 作业结果

Tab. 6 Results of test %

实验序号 test number	分级准确率 grading accuracy	称量准确率 weighing accuracy	破损率 breakage rate
1	96.17	98.43	1.42
2	96.59	98.12	1.38
3	96.93	97.95	1.51
平均值 average value	96.56	98.16	1.43

的优化, 响应曲面法^[23]可以对各实验水平进行分析, 还可以探究各因素之间的相互作用, 解决多变量的优化问题。郑晓伟等^[3]对蛤类滚筒分级工艺参数进行研究, 发现滚筒筛筛孔孔径是影响分级准确率的主要因素, 其次是处理量和滚筒转速。本装置经过响应面优化设计, 分级准确率提高了5%^[16], 实际分级准确率高于仿真实验分级精度值, 误差为1%~2%, 验证了仿真实验的有效性和可靠性。同时装置优化设计后称量准确率高于97%, 与现有的运用图像分割法的贝类分级称量装置相比^[24], 本机提高了分级准确率、分级后落料准确率并达到快速称量。该装置同时集入料、分级和称量功能于一体, 能够实现贝类机械化捕后处理, 节省人工作业成本, 且自动化程度较高。

本实验设计了一种菲律宾蛤仔分级称量一体装置, 研究结果证明, 不同作业参数对菲律宾蛤仔分级精度的影响程度为滚筒筛倾角>滚筒筛转速>喂料量。当喂料量为200 kg/h、滚筒筛倾角为3°、滚筒筛转速为17 r/min时, 菲律宾蛤仔清洗分级称量装置的分级准确率平均值为96.56%, 称量准确率平均值为98.16%, 实现了菲律宾蛤仔的高准确率分级和自动化分级称量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 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. 2024 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 50.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs P. R. China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2024 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 50 (in Chinese).
- [2] 沈建, 林蔚, 郁蔚文, 等. 我国贝类加工现状与发展前景 [J]. 中国水产, 2008(3): 73-75.
Shen J, Lin W, Yu W W, et al. Present situation and development prospect of clams processing in China[J]. *China Fisheries*, 2008(3): 73-75 (in Chinese).
- [3] 郑晓伟, 欧阳杰, 沈建. 蛤类滚筒式分级工艺参数优化 [J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 180-182,239.
Zheng X W, Ouyang J, Shen J. Process parameter optimization of cylinder separator for clams[J]. *Food & Machinery*, 2012, 28(3): 180-182,239 (in Chinese).
- [4] 鲍成伟, 段兰, 宋孟华. 一种蛤蜊分级除杂装置的设计 [J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 126-130.
Bao C W, Duan L, Song M H. A design of the device for clam sorting and impurity removing[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(1): 126-130 (in Chinese).
- [5] 兰东海, 张鹏, 蒋建华, 等. 旋转滚筒振动筛的研制 [J]. 石油矿场机械, 2001, 30(2): 35-36.
Lan D H, Zhang P, Jang J H, et al. Development of rotary drum shale shaker[J]. *Oil Field Equipment*, 2001, 30(2): 35-36 (in Chinese).
- [6] Erem'yants V E, Panova L T, Asanova A A. Choice of rational parameters of Vibration-Shock machines for surface cleaning[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, 42(6): 463-467.
- [7] 滕瑜, 刘从力, 沈建. 我国贝类产业化现状及存在问题 [J]. 科学养鱼, 2012(6): 1-2.
Teng Y, Liu C L, Shen J. Present situation and existing problems of clams industrialization in China[J]. *Scientific Fish Farming*, 2012(6): 1-2 (in Chinese).
- [8] 熊平原, 袁继平, 肖军委, 等. 南方冬种马铃薯分级机结构设计 [J]. 仲恺农业工程学院学报, 2011, 24(2): 61-63,66.
Xiong P Y, Yuan J P, Xiao J W, et al. Structural design of the grader of winter planting potato in south China[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2011, 24(2): 61-63,66 (in Chinese).
- [9] 陆伯勤. 电子称重技术和自动称重系统的进展 [J]. 自动化博览, 1999(1): 1-6.
Lu B Q. Development of electronic weighing technology and automatic weighing system[J]. *Automation Panorama*, 1999(1): 1-6 (in Chinese).
- [10] 韩乔生. 海珍品高效称重及分级装置的研发 [D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
Han Q S. Research and development of high efficiency weighing and grading device for marine products[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016 (in Chinese).
- [11] 吴建波. 基于无刷直流电机的皮带传送控制系统研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
Wu J B. Research on belt transmission control system based on brushless DC motor[D]. Shanghai: Donghua University, 2019 (in Chinese).
- [12] 童锦涛, 赵英杰, 张玉贤, 等. 基于 Arduino 平台的小型物流机器人 [J]. 农机使用与维修, 2020(7): 13-14.
Tong J T, Zhao Y J, Zhang Y X, et al. Study on dynamic speed optimization method for cam grinding[J]. *Agricultural Machinery Using & Maintenance*, 2020(7): 13-14 (in Chinese).
- [13] 张昊晨, 张超, 曹宪周, 等. 基于 EDEM 的组合清理筛筛仿真的性能分析 [J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 147-

152.
Zhang H C, Zhang C, Cao X Z, *et al.* Screening simulation and performance analysis of the combined cleaning screen based on EDEM[J]. *China Oils and Fats*, 2023, 48(11): 147-152 (in Chinese).
- [14] 王豪东, 阮竞兰, 原富林. 基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(6): 151-157.
Wang H D, Ruan J L, Yuan F L. Discrete element analysis of EDEM-based rotary combined multi-layer sieve screening process[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(6): 151-157 (in Chinese).
- [15] 池优阳, 阮竞兰. 垂直圆盘管道刮板输送机 EDEM 仿真研究 [J]. *河南工业大学学报 (自然科学版)*, 2017, 38(5): 93-99.
Chi Y Y, Ruan J L. EDEM simulation research of vertical disc tube scraper conveyor[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 38(5): 93-99 (in Chinese).
- [16] 潘澜澜, 黄炜雯, 王泳杰, 等. 菲律宾蛤仔清洗分级整机设计及参数优化 [J]. *渔业现代化*, 2023, 50(2): 102-112.
Pan L L, Huang W W, Wang Y J, *et al.* Design and operation parameter optimization of cleaning and grading machine for *Ruditapes philippinarum*[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(2): 102-112 (in Chinese).
- [17] 张大卫. 用于粗煤泥脱水脱泥滚筒筛的研制及其性能试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
Zhang D W. The development and study on the trommel screen used for dewatering and desliming of coal slime[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [18] 赵啦啦, 刘初升, 闫俊霞, 等. 颗粒分层过程三维离散元法模拟研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1870-1876.
Zhao L L, Liu C S, Yan J X, *et al.* Numerical simulation on segregation process of particles using 3D discrete element method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1870-1876 (in Chinese).
- [19] 李航企. 滩涂埋栖贝类振动采捕动力学与装备研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
Li H Q. Dynamic simulation and experimental studies on vibration harvesting equipment for tidal buried shellfish[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022 (in Chinese).
- [20] 韩树杰, 戚江涛, 坎杂, 等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 101-108.
Han S J, Qi J T, Kan Z, *et al.* Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 101-108 (in Chinese).
- [21] 杨庆璐, 黄幸媛, 王庆杰, 等. 玉米空间分层施肥装置结构优化与试验 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 175-185.
Yang Q L, Huang X Y, Wang Q J, *et al.* Structure optimization and experiment of corn layered fertilization device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 175-185 (in Chinese).
- [22] Jones J R, Lawrence H G, Yule I J. A statistical comparison of international fertiliser spreader test methods—confidence in bout width calculations[J]. *Powder Technology*, 2008, 184(3): 337-351.
- [23] 王玉萌, 刘德举, 张玉敏, 等. 应用响应曲面法优化萱藻丝状体扩增条件 [J]. *水产学报*, 2022, 46(9): 1646-1655.
Wang Y M, Liu D J, Zhang Y M, *et al.* Optimization of amplification conditions of filaments of *Scytosiphon lomentaria* by response surface methodology (RSM)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(9): 1646-1655 (in Chinese).
- [24] 孙小龙. 基于深度学习的贝类海产品尺寸检测系统设计 [D]. 无锡: 江南大学, 2022.
Sun X L. Design of shellfish seafood size detection system based on deep learning[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022 (in Chinese).

Optimization design and verification of grading weighing device machine for *Ruditapes philippinarum*

PAN Lanlan^{1,2,3}, ZHANG Xinyu^{1,2}, BIAN Ce^{1,2}, ZHANG Zhanqiao^{1,2},
ZHENG Yu^{1,2}, HUANG Weiwen^{1,2}, ZHANG Guochen^{1,2,3*}

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Marine Fishery Equipment Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province,
Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Dalian Ocean University, Ministry of Education, Dalian 116023, China)

Abstract: This study utilized *Ruditapes philippinarum* as the research subject to develop integrated grading and weighing equipment featuring drum screen grading coupled with automatic weighing to address the issues of low accuracy in grading and weighing *R. philippinarum*, as well as insufficient procedural coordination. Utilizing discrete element simulation, the grading and weighing processes of *R. philippinarum* were simulated and analyzed. The impact of roller screen rotational speed, roller screen tilt angle, and feed capacity on grading and weighing accuracies was investigated using response surface analysis in Design-Expert software. This study aimed to optimize the operational parameters of the complete equipment and validate its performance. The findings indicated that the primary factors affecting the accuracy of grading and weighing *R. philippinarum*, in descending order of influence, were the roller screen tilt angle, roller screen rotational speed, and the feed capacity. The device achieved a grading accuracy of 96.09% and a weighing accuracy of 98.79% under operational conditions of a roller screen rotational speed of 17 r/min, a roller screen tilt angle of 3°, and a feed capacity of 200 kg/h. After completing the prototype manufacturing and operational validation, the grading accuracy was recorded at 96.56%, and the weighing accuracy at 98.16%. The results demonstrated that setting appropriate parameters for the roller screen tilt angle, roller screen rotational speed, and feed capacity could significantly enhance grading and weighing accuracies in the process of handling *R. philippinarum*. This research provides valuable insights for the design of post-harvest grading and weighing devices for shellfish.

Key words: *Ruditapes philippinarum*; grading; weighing; discrete element simulation; grading accuracy

Corresponding author: ZHANG Guochen. E-mail: zhangguochen@dlou.edu.cn

Funding projects: Agricultural and Rural Affairs of Liaoning Province (2024), *Ruditapes philippinarum* Excellent Germplasm Resources Exploration and Creation Project; National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900701)