DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.02.006

智能贝类播苗设备离散元仿真参数标定

栾宇航[1], 钱宇星[1], 高敏[1], 王明宇[1], 李秀辰[1, 2, 3], 张寒冰[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. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心,辽宁大连,116023; 3. 设施渔业教育部重点实验室,辽宁大连,116023)

摘要:为提高智能贝类播苗设备离散元仿真参数的准确性,本研究首次系统标定了移滩规格四角蛤蜊贝苗与接触材料(EVA、不锈钢板)及贝苗间的接触参数。通过物理特性试验与离散元相结合的方法对贝苗接触参数进行标定。利用三维扫描仪逆向工程技术获取贝苗轮廓,基于Hertz-Mindlin无滑移接触模型建立贝苗颗粒模型。分别采用自由下落碰撞法、倾斜平面滑动法、固定斜面滚动法对贝苗与接触材料(EVA、不锈钢板)间接触参数进行标定,结果表明:贝苗与EVA间碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为0.339、0.538、0.205;贝苗与不锈钢板间碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为0.128、0.323、0.177。通过悬挂碰撞法与MXZ-1型摩擦系数仪测定贝苗间接触参数。以贝苗与贝苗间接触参数为试验因素,以实测堆积角与仿真堆积角相对误差为指标,进行三因素三水平正交试验,以最小相对误差为优化目标,对试验数据寻优分析得到:贝苗与贝苗间碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为0.170、0.620、0.313。通过提升圆筒法对标定结果进行验证试验,结果表明:仿真堆积角与实测堆积角相对误差为3.6%,证明标定结果真实可靠。本研究填补了移滩四角蛤蜊贝苗离散元参数标定的空白,为智能播苗设备的料仓倾角、落料口位置和叶轮盘等关键部件优化提供了理论依据。

关键词:智能播苗设备;四角蛤蜊;贝苗;离散元;参数标定

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)02-0069-10

栾宇航, 钱宇星, 高敏, 王明宇, 李秀辰, 张寒冰. 智能贝类播苗设备离散元仿真参数标定[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 69−78

LUAN Yuhang, QIAN Yuxing, GAO Min, WANG Mingyu, LI Xiuchen, ZHANG Hanbing. Discrete element simulation parameter calibration for smart shellfish seeding devices [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 69−78

0 引言

贝类是我国水产养殖重要品种,2023年全国贝类总产量达16 659 kt,占水产养殖总量的28.6%[1]。四角蛤蜊(*Mactra veneriformis*)凭借其营养价值高、资源丰富等特点,在辽宁、山东等沿海地区形成规模化产业带。播苗是贝类养殖首要环节,播苗质量与养殖效益密切相关。目前贝类播苗仍主要依靠人工作业,存在劳动强度大、播苗均匀度差和生产效率低等问题,难以满足大规模化贝类养殖的需求,养殖企业迫切需要开发高效、智能化的播苗设备。国家“十三五”和“十四五”渔业发展规划将水产养殖机械化与智能化被列为重点攻关方向。

离散元法(discrete element method,DEM)作为一种能够有效模拟颗粒物料运动与相互作用的数值方法,在贝类智能播苗设备关键零部件的研究中展现出显著优势。对贝类智能播苗设备进行离散元法研究时,需要给定四角蛤蜊密度、剪切模量、泊松比等本征参数和动静摩擦系数、碰撞恢复系数等接触参数[2-3]。四角蛤蜊贝苗本征参数可通过物理特性试验直接测定,而接触参数受限于试验条件的复杂性,难以准确获得,且接触参数对离散元仿真的准确性具有显著影响,因此有必要对四角蛤蜊贝苗的接触参数进行标定。

近年来,离散元法在农业机械设计中的应用已较为成熟,例如,张胜伟等[4]通过试验与仿真结合的方法优化了绿豆种子的离散元参数,验证了堆积角仿真值与实测值的一致性;刘瑞等[5]基于包衣玉米种子的休止角误差标定了其接触参数,为精密排种设备设计提供了依据;温祥宇等[6]通过多因素显著性分析,提出了

收稿日期:2025-03-03 修回日期:2025-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2400800);辽宁省教育厅项目(LJ232410158048)

第一作者:栾宇航,男,1998年生,辽宁沈阳人,硕士研究生;研究方向为渔业装备。E-mail: 1151681767@qq.com

*通信作者:张寒冰,男,1986年生,辽宁大连人,博士,副教授;研究方向为渔业装备工程。E-mail: zhanghanbing@dlou.edu.cn

颗粒肥料离散元参数的高效标定方法。然而,目前针对贝类苗种的离散元参数标定研究较少,LI等[7]对菲律宾蛤仔进行了接触参数标定;LOU等[8]利用多因素显著性筛选试验对成年四角蛤蜊接触参数进行标定;但对移滩规格四角蛤蜊苗种未见报道。四角蛤蜊作为我国重要的经济贝类,其播苗设备的智能化设计亟须高精度仿真模型支撑。本研究首次将离散元参数标定方法拓展至移滩四角蛤蜊贝苗,为智能化渔业机械的仿真设计提供了新思路。

本研究以移滩四角蛤蜊贝苗为研究目标,通过物理特性试验获得四角蛤蜊贝苗本征参数和基本接触参数;利用逆向工程技术对四角蛤蜊贝苗轮廓扫描重构,修补点云数据后,导入EDEM离散元仿真软件中创建四角蛤蜊贝苗颗粒模型;开展三因素三水平正交试验,分析四角蛤蜊贝苗间接触参数对堆积角相对误差的影响,通过Design-Expert进行方差分析,以最小相对误差为优化目标,得到最优组合参数,标定得到贝类智能播苗设备仿真所需的离散元仿真参数,为贝类智能播苗设备设计和优化提供理论依据。

1 模型建立

1.1 四角蛤蜊贝苗物理模型

试验采用来自盘锦光合蟹业有限公司50粒/kg的移滩规格四角蛤蜊贝苗,如图1(a),随机取50粒样本,利用排水法[9]测定其密度ρ为(1.3±0.05) g/cm^3;四角蛤蜊泊松比ν为0.25,剪切模量G为11 MPa[10]。

对四角蛤蜊贝苗进行离散元建模。采用Revopoint POP2三维扫描仪(精度0.05 mm)获取贝苗轮廓,如图1(b),通过Geomagic Wrap 2021软件对点云数据进行修复与表面重构,生成高精度STL模型,如图1(c)。将模型导入离散元软件(EDEM 2022),离散元接触模型选择无滑移接触模型(Hertz-Mindlin/no slip),通过球形颗粒对贝苗进行填充[11-12],如图1(d)。四角蛤蜊贝苗离散元模型建模过程如图1所示。

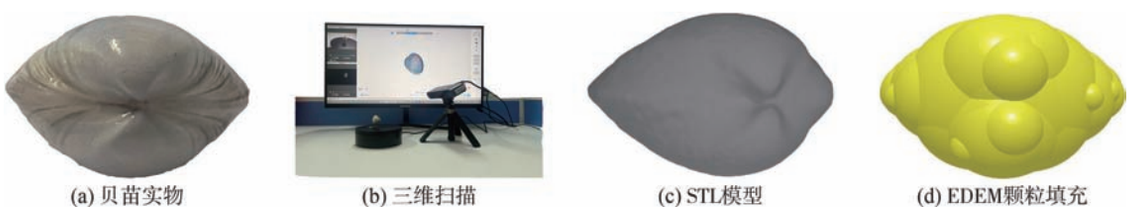


图1 贝苗离散元模型建模过程

Figure 1 Modeling process of discrete element model of clam seedling

1.2 接触材料模型选取

在离散元仿真中,接触类型包含贝苗与贝苗及贝苗与接触材料两种相互作用。本研究选取不锈钢板和EVA材料与贝苗相接触,其物理参数如表1所示。

表1 接触材料物理参数

Table 1 Contact material physical parameters

材料	参数	数值
不锈钢板	泊松比v	0.3
	弹性模量E/Pa	7.42×10^{10}
	密度ρ/(g·cm^{-3})	7.93
EVA	泊松比v	0.25
	弹性模量E/Pa	1.64×10^{8}
	密度ρ/(g·cm^{-3})	0.92

2 四角蛤蜊贝苗与材料间接触参数标定

2.1 四角蛤蜊贝苗与材料间碰撞恢复系数试验

贝苗与接触材料间碰撞恢复系数可通过自由下落碰撞法测定[13-14]。将贝苗放置于距接触材料上方H=400 mm处,使其自由下落。下落后贝苗与接触材料发生碰撞反弹,通过YVSION高速摄像机(分辨率:640像素×374像素、1 000帧)记录最大回弹高度h。实际试验中碰撞恢复系数e_x可表示为:贝苗与接触材料碰撞后相对速度与碰撞前相对速度比值,试验原理如图2(a)所示。也可由最大回弹高度h与下落距离H比值代替,计算公式为

$$e_x=\sqrt{\frac{h}{H}} \tag{1}$$

式中:H——下落高度,mm;

h——最大回弹高度,mm。

实际试验每组重复5次,试验过程如图2(b)所示,根据式(1)计算碰撞恢复系数,结果取平均值。结果表明:贝苗与EVA最大回弹高度均值h_1=44.58 mm,贝苗与不锈钢板最大回弹高度均值h_2=6.3 mm;贝苗与EVA碰撞恢复系数为0.326、贝苗与不锈钢板碰撞恢复系数为0.122。

仿真试验中,贝苗与接触材料的碰撞恢复系数取值范围为0.1~0.9,增量为0.1,除碰撞恢复系数外的接触参数设为0,试验过程如图2(c)所示,每组试验重复5次,结果取均值。将碰撞恢复系数e_x作为自变量,最大回弹高度h作为因变量,将试验所得参数绘制成散点图并对其进行非线性回归分析,建立最大回弹高度h与碰撞恢复系数e_x拟合曲线,结果如图3所示。

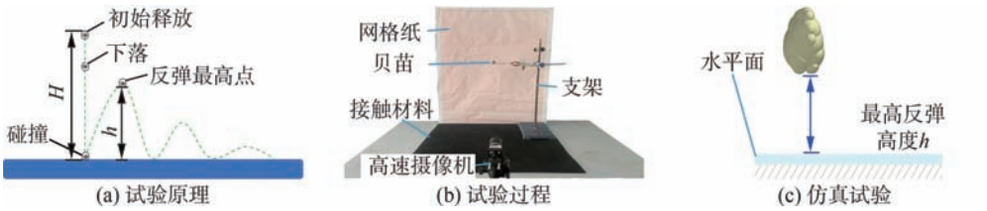


图 2　贝苗与接触材料间碰撞恢复系数标定试验

Figure 2　Calibration test of collision recovery coefficient between clam seedlings and materials

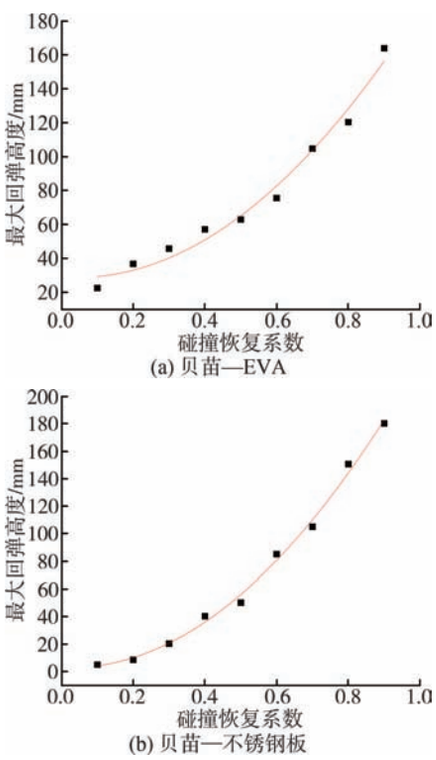


图 3　碰撞恢复系数与最大回弹高度拟合曲线

Figure 3　Collision recovery coefficient and maximum rebound height fit curve

最大回弹高度 h 与碰撞恢复系数 e_x 的拟合方程分别为

$$h_1 = 173.2e_{x1}^{\ 2} - 14.462e_{x1} + 29.032 \quad (R^2 = 0.981\,3) \tag{2}$$

$$h_2 = 234.41e_{x2}^{\ 2} - 10.915e_{x2} + 2.975\,5 \quad (R^2 = 0.995\,3) \tag{3}$$

式中：h_1——贝苗与 EVA 间最大回弹高度，mm；

h_2——贝苗与不锈钢板间最大回弹高度，mm；

e_{x1}——贝苗与 EVA 间碰撞恢复系数；

e_{x2}——贝苗与不锈钢板间碰撞恢复系数。

将自由下落碰撞法所测得最大回弹高度的结果分别代入相应拟合方程(2)、(3)，得到贝苗与接触材料间碰撞恢复系数(e_{x1}=0.339、e_{x2}=0.128)，并代入离散元软件进行仿真验证，验证得到：在该参数下所得到的最大回弹高度与实际最大回弹高度相对误差较小，确定了贝苗与 EVA 间碰撞恢复系数为 e_{x1}=0.339，贝苗与不锈钢间碰撞恢复系数为 e_{x2}=0.128。

2.2　贝苗与材料间静摩擦系数试验

贝苗与材料间静摩擦系数通过倾斜平面滑动法进行测定。其试验原理为当质量为 m 的贝苗在与水平面夹角为 α 的斜面上静止时，贝苗重力可分解为 F_1(平行于斜面)和 F_2(垂直于斜面)两个分力。当 α 增加到贝苗滑动摩擦角时，F_1 也随之增大，此时 F_1 大于贝苗与材料间静摩擦力 f，贝苗开始滑动[15-16]，试验原理如图 4(a)所示，根据受力分析可得静摩擦系数计算公式为

$$\mu_x = f/F_2 = mg\sin\alpha/(mg\cos\alpha) = \tan\alpha \tag{4}$$

式中：f——静摩擦力，N；

F_2——重力垂直于斜面分力，N；

α——斜面与水平面夹角，(°)；

μ_x——静摩擦系数。

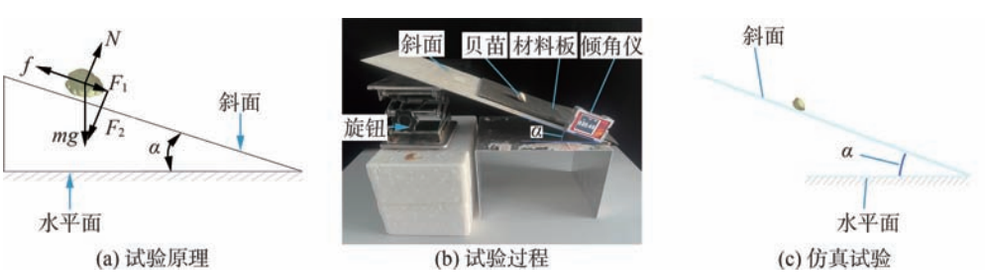


图 4　贝苗与材料间静摩擦系数标定试验

Figure 4　Calibration test of static friction factor between clam seedlings and materials

实际试验时将贝苗放置于图 4(b)所示接触材料的斜面左端，匀速转动旋钮，使斜面缓慢上升，通过倾角仪记录贝苗滑动时夹角 α，试验重复 5 次，结果取平均值，通过式(4)计算静摩擦系数。结果表明：贝苗与 EVA 滑动摩擦角均值 α_1=29.11°，贝苗与 EVA 静摩擦系数为 0.560；贝苗与不锈钢板滑动摩擦角均值 α_2=17.70°，贝苗与不锈钢板静摩擦系数为 0.320。

仿真试验过程中，碰撞恢复系数采用 2.1 节已标

定参数,贝苗与接触材料的静摩擦系数取值范围为0.1~0.9,增量为0.1,其他参数设为0,每组试验重复5次,结果取均值。以静摩擦系数μ_x为自变量,斜面与水平面夹角α为因变量,将试验结果绘制成散点图并对其进行非线性回归分析,建立静摩擦系数μ_x与夹角α拟合曲线,结果如图5所示。

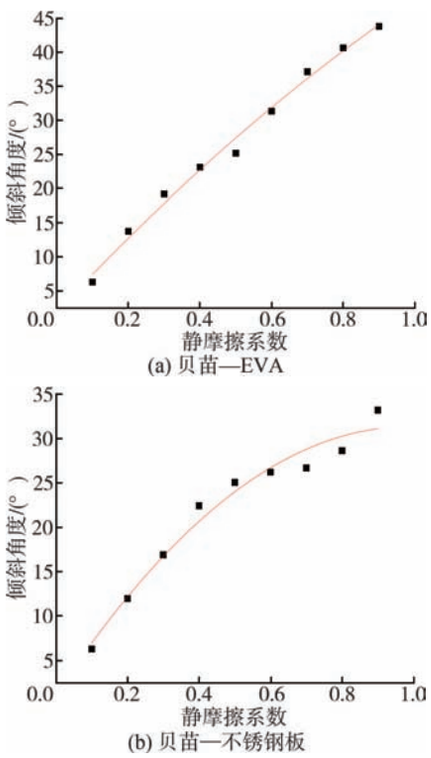


图5 静摩擦系数与夹角拟合曲线

Figure 5 Static friction coefficient and angle fitting curve

得到静摩擦系数与倾斜角度的拟合方程分别为

$$\mu_{x1}=-10.377\alpha_1^{\ 2}+56.166\alpha_1-1.913\,8 \quad (R^2=0.991\,5) \tag{5}$$

$$\mu_{x2}=-31.04\alpha_2^{\ 2}+61.215\alpha_2+1.149\,5 \quad (R^2=0.972\,3) \tag{6}$$

式中:μ_{x1}、μ_{x2}——贝苗与EVA、不锈钢板的静摩擦系数;

α_1、α_2——EVA、不锈钢板与水平面的夹角,(°)。

将倾斜平面滑动法所测得的斜面与水平面夹角分别带入相应拟合方程(5)、(6),得到贝苗与接触材料间静摩擦系数(μ_{x1}=0.538、μ_{x2}=0.323),并将其代入EDEM进行仿真验证,验证得到:在该参数下所得到夹角与实际夹角相对误差较小,确定了贝苗与EVA间静摩擦系数μ_{x1}=0.538,贝苗与不锈钢间静摩擦系数μ_{x2}=0.323。

2.3 贝苗与材料间滚动摩擦系数试验

贝苗与材料间滚动摩擦系数通过固定斜面滚动法进行标定[17],标定试验如图6所示。

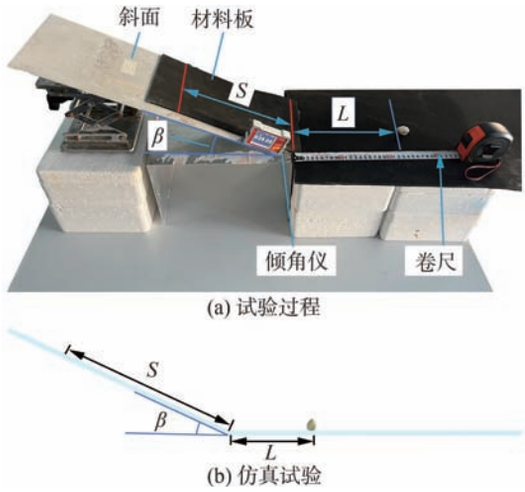


图6 贝苗与材料间滚动摩擦系数标定试验

Figure 6 Calibration test of rolling friction factor between clam seedlings and materials

试验原理为:将贝苗以初速度为零释放于斜面与水平面夹角为β的斜面板上,贝苗沿斜面向下滚动至水平面,贝苗在滚动摩擦力的作用下静止于水平面,斜面滚动距离为S,水平滚动距离为L,假设贝苗仅受滚动摩擦力作用,则通过能量守恒定律可得

$$mgS\sin\beta=mg(S\cos\beta+L)\mu_s \tag{7}$$

式中:β——斜面与水平面夹角,(°);

L——水平滚动距离,mm;

S——斜面滚动距离,mm;

μ_s——滚动摩擦系数。

由于贝苗形状近似球形,当斜面与水平面夹角β过大或斜面滚动距离S过长时,贝苗在运动过程中易发生非连续滚动现象,即贝苗跳动,影响试验结果准确性;当夹角β过小与滚动距离S过短时,则会造成滚动摩擦力大于驱动力,导致贝苗滚动距离较小或不易滚动至水平面上,难以完成测试。因此需要通过大量预试验确定,最终确定夹角β=25°和斜面滚动距离S=200 mm时最佳。

为减小试验误差,试验重复30次,记录贝苗静止时水平距离L,并根据式(7)计算滚动摩擦系数,结果取平均值。结果表明:贝苗在EVA上滚动距离均值L_1=215.95 mm,贝苗在不锈钢板上的滚动距离均值L_2=262.15 mm;贝苗与EVA间滚动摩擦系数为0.215、贝苗与不锈钢板间滚动摩擦系数为0.192。

仿真试验中,设置2.1节和2.2节已标定的碰撞恢复系数与静摩擦系数,其他接触参数设为0,选取滚动摩擦系数范围为0.1~0.5,增量为0.1,每组试验重复10次,记录贝苗静止时水平距离L,结果取均值。

以滚动摩擦系数μ_s为自变量,水平滚动距离L为

因变量，将试验结果导入Origin 2022软件生成散点图，采用非线性最小二乘法优化参数，构建滚动摩擦系数与水平滚动距离回归模型，结果如图7所示。

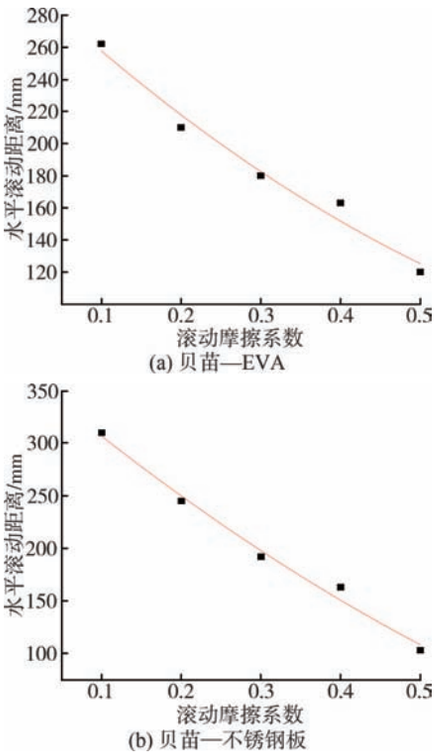


图7　滚动摩擦系数与水平滚动距离回归模型

Figure 7　Rolling friction coefficient and horizontal rolling distance regression model

得到滚动摩擦系数与滚动距离的拟合方程分别为

$$\mu_{s1}=221.43L_1^{\ 2}-463.86L_1+301.8 \quad (R^2=0.9784) \tag{8}$$

$$\mu_{s2}=242.86L_2^{\ 2}-641.71L_2+368.4 \quad (R^2=0.99) \tag{9}$$

式中：μ_{s1}、μ_{s2}——贝苗与EVA、不锈钢板的滚动摩擦系数；

L_1、L_2——贝苗在EVA、不锈钢板上的水平滚动距离，mm。

将固定斜面滚动法所测得的水平滚动距离结果分别带入相应拟合方程(8)、(9)，得到贝苗与接触材料间滚动摩擦系数(μ_{s1}=0.205、μ_{s2}=0.177)，并将其代入EDEM进行仿真验证。验证得到：在该参数下所得到水平滚动距离与实际水平滚动距离相对误差较小，确定了贝苗与EVA间滚动摩擦系数μ_{s1}=0.205，贝苗与不锈钢间滚动摩擦系数μ_{s2}=0.177。

3　四角蛤蜊贝苗间接触参数标定

贝苗间接触参数可通过贝苗堆积角进行标定。通过悬挂碰撞法和摩擦系数仪确定贝苗间碰撞恢复系数和贝苗间静/滚动摩擦系数取值范围，进行三因素三水平正交试验并构建二次回归模型，寻找最优组合参数，实现贝苗间接触参数标定。

3.1　贝苗间碰撞恢复系数测定

通过悬挂碰撞法对贝苗与贝苗间碰撞恢复系数测定[18]，试验中使贝苗b自然悬挂并保持静止，将贝苗a提升一定高度，使其竖直方向与基准线的距离为H_0，贝苗a释放后与贝苗b发生连续碰撞，连续碰撞过程反映了贝苗间碰撞恢复特性，试验如图8所示。

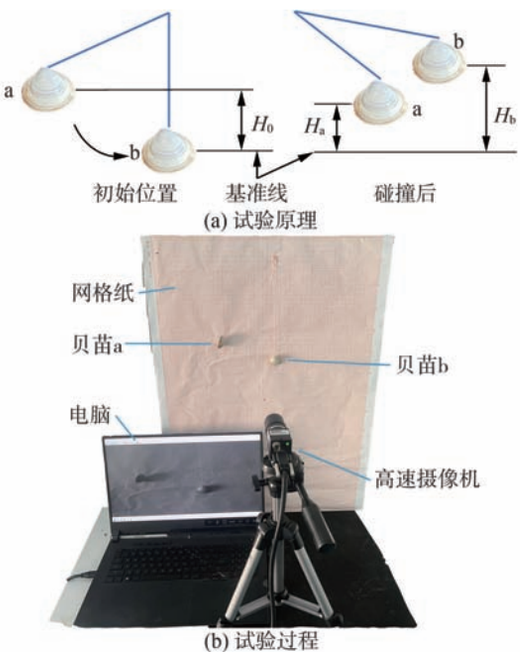


图8　贝苗与贝苗间碰撞恢复系数试验

Figure 8　Test of collision recovery coefficient between clam seedlings and clam seedlings

通过高速摄像机记录试验过程，并结合坐标纸计算两个贝苗碰撞后最大摆动高度H_a、H_b，贝苗间碰撞恢复系数计算公式为

$$e=\frac{\sqrt{H_b}-\sqrt{H_a}}{\sqrt{H_0}} \tag{10}$$

式中：H_0——贝苗a竖直方向与基准线高度，mm；

H_a——贝苗a碰撞后与基准线间最大摆动高度，mm；

H_b——贝苗b碰撞后与基准线间最大摆动高度，mm；

e——贝苗间碰撞恢复系数。

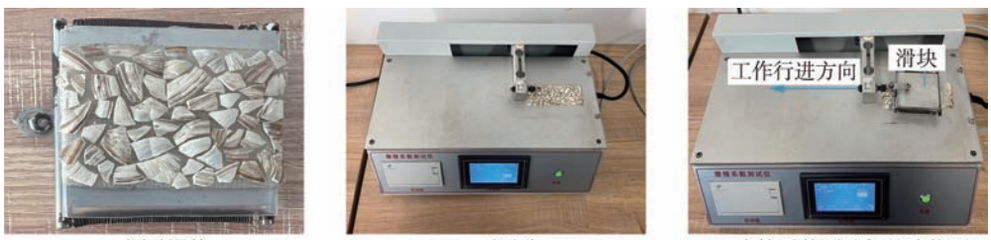
试验选取贝苗a在30 mm高度下进行30次试验。通过高速摄像机记录贝苗a、b碰撞过程并通过坐标纸读取得到贝苗a上升高度H_a，贝苗b上升高度H_b。由式(10)计算得到贝苗间碰撞恢复系数范围为0.170～0.440，取平均值为0.310。

3.2　贝苗间摩擦系数测定

通过MXZ-1型摩擦系数测定仪对贝苗间摩擦系数进行测量，该装置可同时测定两接触部件的静摩擦

系数和动摩擦系数[19-20]。

将贝苗壳均匀制成50 mm×100 mm样板固定于试验台,另取50 mm×50 mm样板安装于滑块表面,试验装置如图9所示。放置好滑块后启动测试程序,试验重复20次,测得贝苗之间静摩擦系数为0.581~0.675,贝苗之间动摩擦系数为0.307~0.454。



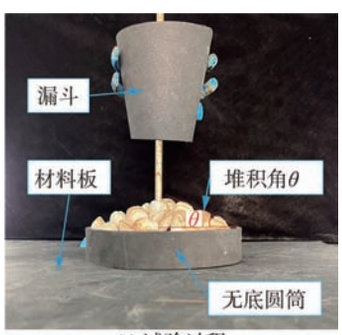
(a) 测试滑块 (b) 试验台 (c) 摩擦系数测试仪试验装置

图9 贝苗与贝苗间摩擦系数测定试验

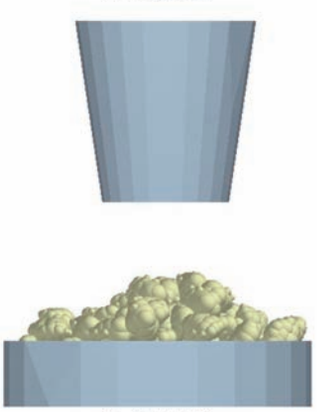
Figure 9 Test for the friction coefficient between the clam seedlings and clam seedlings

3.3 实际堆积角试验

采用漏斗圆筒法进行堆积角试验,试验平台由直径为160 mm,高20 mm的圆筒及漏斗组成,试验材料均为EVA,试验装置如图10所示。



(a) 试验过程



(b) 仿真试验

图10 堆积角测定试验

Figure 10 Stacking angle test

试验时,将圆筒填满贝苗并刮平,漏斗置于圆筒上方80 mm处,内部预装适量贝苗并用挡板抵住漏斗下端,移除挡板后,贝苗自由下落在圆筒上端堆积,形成堆积角。

试验结束后,将贝苗颗粒堆积图像导入Matlab软件,对图像进行灰度化处理并增强灰度图片,运用sobel算子对增强后图片进行边缘检测,扫描轮廓边缘点并对其进行线性回归分析,拟合直线与水平面夹角θ即为堆积角,如图11所示。

每组试验重复5次,结果取平均值,实际测得贝苗堆积角θ均值为22.1°。

3.4 仿真堆积角试验

通过研究贝苗间静摩擦系数μ_n、滚动摩擦系数μ_r和碰撞恢复系数e及两两间交互项对相对误差Y的影响,相对误差计算公式见式(11),设计三因素三水平正交试验,基于Design-Expert软件对试验数据进行二次回归分析,寻找最佳参数组合。其水平编码表如表2所示,试验方案及结果如表3所示。

$$Y=\frac{|\theta'-\theta|}{\theta} \tag{11}$$

式中:θ——实测堆积角,(°);

θ'——仿真堆积角,(°)。

各接触参数对堆积角相对误差的方差分析如表4所示,模型失拟项$P=0.812\ 9>0.01$不显著,说明模型具有较高的拟合度,回归项$P<0.000\ 1$显著,说明回归结果具有可靠性,证明该模型能够有效反映出贝苗各个接触参数对相对误差的影响[21-23]。因素e、μ_n、μ_r均对堆积角相对误差有极显著影响($P<0.01$),因素e、μ_n、μ_r之间的交互作用和因素e的平方项影响较大($P<0.05$),因素μ_n和因素μ_r的平方项影响均不显著($P>0.05$)。

去除对指标影响不显著项后,通过Design-Expert软件得拟合回归方程为

$$\begin{aligned}Y=&10.12+1.56e+1.79\mu_n+2.20\mu_r-1.01e\mu_n\\&-1.56e\mu_r-0.912\ 5\mu_n\mu_r-1.11e^2\end{aligned} \tag{12}$$

根据上述试验结果及二次回归方程,寻找贝苗间静摩擦系数、滚动摩擦系数、碰撞恢复系数的最优解,其设定目标函数及约束条件为

$$\begin{cases}\min Y(e,\mu_n,\mu_r)\\ s.t.\begin{cases}0.17\leqslant e\leqslant 0.44\\0.518\leqslant\mu_n\leqslant 0.675\\0.307\leqslant\mu_r\leqslant 0.454\end{cases}\end{cases} \tag{13}$$

寻优得到静摩擦系数为 0.620、滚动摩擦系数为 0.313、贝苗间碰撞恢复系数为 0.170 时，堆积角实测值与仿真相对误差最小，为 3.10%。



(a) 原始图像　(b) 边缘检测　(c) 拟合直线

图 11　Matlab 软件处理

Figure 11　Matlab software processing

表 2　因素水平编码表

Table 2　Factor level coding table

编码	因素		
	e	μ_n	μ_r
−1	0.17	0.581	0.307
0	0.305	0.628	0.380 5
1	0.44	0.675	0.454

表 3　三因素三水平正交试验方案与结果

Table 3　Scheme and results of three-factor and three-level orthogonal experiment

序号	因素			Y/%
	e	μ_n	μ_r	
1	0.17	0.628	0.307	3.18
2	0.44	0.628	0.454	10.97
3	0.17	0.628	0.454	10.69
4	0.305	0.581	0.307	4.62
5	0.305	0.628	0.380 5	9.51
6	0.305	0.628	0.380 5	10.54
7	0.44	0.628	0.307	9.71
8	0.44	0.581	0.380 5	9.11
9	0.305	0.675	0.307	9.69
10	0.17	0.581	0.380 5	4.25
11	0.305	0.628	0.380 5	9.37
12	0.44	0.675	0.380 5	10.98
13	0.305	0.628	0.380 5	10.67
14	0.17	0.675	0.380 5	10.17
15	0.305	0.581	0.454	10.58
16	0.305	0.628	0.380 5	10.51
17	0.305	0.675	0.454	12.27

3.5　验证试验

采用无底圆筒法进行验证试验，选取直径为 100 mm、高 140 mm 的不锈钢无底圆筒，圆筒填充适量贝苗后，无底圆筒以 0.05m/s 速度竖直上升，待贝苗稳定后测其堆积角，试验重复 3 次，结果取均值，得到实际堆积角 $\theta=26.8°$。基于标定所得接触参数，如表 5 所示，进行仿真验证，在相同试验条件下测定贝苗的仿真堆积角 $\theta'=27.7°$，与实测堆积角相对误差 $Y=3.6\%$，试验结果证明了所标定接触参数的有效性，标定方法满足离散元仿真要求。

表 4　试验结果方差分析

Table 4　Analysis of variance of experimental results

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	107.67	9	11.96	43.18	<0.000 1
e	19.47	1	19.47	70.27	<0.000 1
μ_n	25.49	1	25.49	92.00	<0.000 1
μ_r	38.63	1	38.63	139.43	<0.000 1
$e\mu_n$	4.10	1	4.10	14.80	0.006 3
$e\mu_r$	9.77	1	9.77	35.25	0.000 6
$\mu_n\mu_r$	3.33	1	3.33	12.02	0.010 4
e^2	5.15	1	5.15	18.60	0.003 5
μ_n^2	0.628 2	1	0.628 2	2.27	0.175 9
μ_r^2	0.596 1	1	0.596 1	2.15	0.185 9
失拟项	0.373 9	3	0.124 6	0.318 4	0.812 9
误差	1.57	4	0.391 4		
总和	109.61	16			

表 5　标定参数汇总表

Table 5　Calibration parameter summary

接触类型	碰撞恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
贝苗—贝苗	0.170	0.620	0.313
贝苗—不锈钢板	0.128	0.323	0.177
贝苗—EVA	0.339	0.538	0.205

4　结论

1)以四角蛤蜊贝苗为研究对象，通过自由下落碰撞法、倾斜平面滑动法、固定斜面滚动法对贝苗与接触材料(不锈钢板、EVA)间的静摩擦系数、滚动摩擦系

数和碰撞恢复系数进行了标定。结果表明:贝苗与不锈钢板静摩擦系数为0.323、贝苗与不锈钢板滚动摩擦系数为0.177、贝苗与不锈钢板碰撞恢复系数为0.128;贝苗与EVA静摩擦系数为0.538、贝苗与EVA滚动摩擦系数为0.205、贝苗与EVA碰撞恢复系数为0.339。

2)采用悬挂碰撞法和MXZ-1型摩擦系数仪对贝苗间的静摩擦系数、滚动摩擦系数和碰撞恢复系数进行测定,利用堆积角试验,设计三因素三水平正交试验,研究贝苗间静摩擦系数、滚动摩擦系数和碰撞恢复系数及两两间交互项对相对误差 Y 影响,利用Design-Expert软件对试验数据进行二次回归分析,寻优得到贝苗与贝苗间静摩擦系数0.620、贝苗与贝苗间滚动摩擦系数0.313和贝苗与贝苗间碰撞恢复系数0.170。

3)通过无底圆筒法验证标定参数,实际堆积角 $\theta=26.8°$,仿真堆积角为 $\theta'=27.7°$,堆积角相对误差 $Y=3.6\%$。结果表明:标定的四角蛤蜊贝苗离散元模型接触参数准确可靠,可直接用于智能贝类播苗设备的料仓倾角、落料口位置和叶轮盘等关键部件优化,为智能贝类播苗装备研发提供了可靠的数据支持。

4)随着国家政策不断支持,贝类播苗设备从传统机械化向智能化、精准化、无人化转变[24-25]。贝苗离散元参数标定在此转变中起到关键作用:通过构建贝苗与接触材料模型模拟撒播过程,优化机械结构;利用参数构建数字化精准播苗系统,结合贝类播苗设备,实现自适应播苗策略。智能贝类播苗设备的推广应用对推动底播贝类养殖企业发展,构建贝类底播增养殖生态农牧化新模式具有重要意义。

参 考 文 献

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

[2] 徐泳, 李红艳, 黄文彬. 耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J]. 农业工程学报, 2003(2): 34−38.
XU Yong, LI Hongyan, HUANG Wenbin. Modeling and methodological strategy of discrete element method simulation for tillage soil dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003 (2): 34−38.

[3] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49−56.
ZHANG Rui, HAN Tianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49−56.

[4] 张胜伟, 李华. 绿豆种子离散元参数标定及排料设备优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 45−52.
ZHANG Shengwei, LI Hua. Calibration of discrete element parameters of mung bean seeds and optimization of discharging equipment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (12): 45−52.

[5] 刘瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 112−118.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 112−118.

[6] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115−122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115−122, 142.

[7] Li H Q, Zhang G C, Li X C, et al. Calibration of the discrete element method parameters in living juvenile Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) and seeding verification [J]. AgriEngineering, 2021, 3 (4): 894−906.

[8] LOU Y Z, ZHANG G, LI X, et al. Experiment and calibration of contact parameters of *Mactra veneriformis* based on DEM [J]. Computational Particle Mechanics, 2025, 12(1): 313−326.

[9] 董晓威. 垂直螺旋式水稻侧深施肥机理与装置参数研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2019.
DONG Xiaowei. Mechanism and parameters of vertical spiral rice deep-side fertilizing device [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.

[10] 黄伟, 李秀辰, 母刚, 等. 离心式滩涂贝类播苗装置设计与试验[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(2): 320−328.
HUANG Wei, LI Xiuchen, MU gang, et al. Design and test of a centrifugal shellfish seeding device for tidal flat aquaculture [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(2): 320−328.

[11] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294−300.
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning [J]. Transactions of the Chinese

Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 294－300.

[12] 李志良. 基于点云数据的真三维建模方法研究[D]. 太原：太原理工大学, 2014.
LI Zhiliang. The true 3D modeling method based on point cloud data [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.

[13] 王庚祥, 马道林, 刘洋, 等. 多体系统碰撞动力学中接触力模型的研究进展[J]. 力学学报, 2022, 54(12): 3239－3266.
WANG Gengxiang, MA Daolin, LIU Yang, et al. Research progress of contact force models in the collision mechanics of multibody system [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(12): 3239－3266.

[14] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油葵籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44－53.
LIU Yang, ZONG Wangyuan, MA Lina, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 44－53.

[15] 缪雨龙, 赵毅红, 袁仨, 等. 玉米种子离散元模型建立及参数标定[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(18): 209－214.

[16] 魏雨涵, 赵丽莹. 韭菜种子物性参数测定及离散元参数标定[J]. 南方农业, 2024, 18(13): 236－240.

[17] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 80－90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 80－90.

[18] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 41－50.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 41－50.

[19] 祝天荣, 田清华, 何琳, 等. 摩擦系数测试仪可靠性分析方法[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 102－105.
ZHU Tianrong, TIAN Qinghua, HE Lin, et al. Methods on reliability analysis of friction coefficient test instrument [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(5): 102－105.

[20] 范珺. GB 10006与ASTM D 1894塑料薄膜摩擦系数测定方法的比较[J]. 中国包装, 2014, 34(5): 48－51.

[21] ZHANG H B, LI P P, ZHANG H N, et al. Design and experiment of cone disk centrifugal shellfish seeding device [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1136844.

[22] 朱惠斌, 李镕东, 白丽珍, 等. 不同含水率下水稻秸秆的离散元参数标定[J/OL]. 南京农业大学学报, 1－15 [2025－03－15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240731.0931.002.html.
ZHU Huibin, LI Rongdong, BAI Lizhen, et al. Calibration of discrete meta-parameters of ricestraw at different water contents [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1－15 [2025－03－15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240731.0931.002.html.

[23] 樊成赛, 何瑞银, 施印炎, 等. 有机无机混合肥料离散元参数标定方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(2): 402－413.
FAN Chengsai, HE Ruiyin, SHI Yinyan, et al. Study on discrete element parameter calibration method for organic inorganic mixed fertilizers [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(2): 402－413.

[24] 李道亮, 刘畅. 人工智能在水产养殖中研究应用分析与未来展望[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(3): 1－20.
LI Daoliang, LIU Chang. Recent advances and future outlook for artificial intelligence in aquaculture [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(3): 1－20.

[25] 张志磊, 郭飞宏, 周炳洋, 等. 滩涂贝类采收设备自动驾驶滑移模型研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 81－90.
ZHANG Zhilei, GUO Feihong, ZHOU Bingyang, et al. Research on slip model of automatic driving of shellfish harvesting equipment in mudflat [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 81－90.

Discrete element simulation parameter calibration for smart shellfish seeding devices

LUAN Yuhang[1], QIAN Yuxing[1], GAO Min[1], WANG Mingyu[1], LI Xiuchen[1, 2, 3], ZHANG Hanbing[1, 2, 3*]

(1. *School of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*; 2. *Marine Fishery Equipment Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province, Dalian* 116023, *China*; 3. *Facilities Key Laboratory of Fisheries Ministry of Education, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: To enhance the accuracy of the discrete element method (DEM) simulation parameters for smart shellfish seeding equipment, this study systematically calibrated the contact parameters between the clam seedling of the shifting beach quadrangular clam and the contact materials (EVA, stainless steel plate) and the clam seedling for the first time. This calibration process integrated physical property tests with DEM simulation. Reverse engineering techniques employing a 3D scanner were utilized to obtain the clam seedling contours. Subsequently, particulate model of the clam seedlings were developed based on the Hertz-Mindlin no-slip contact model with DEM framework. Free-fall collision method, inclined plane sliding method, and fixed inclined plane rolling method were used to calibrate the contact parameters between the clam seedlings and contact materials (EVA, stainless steel plate), respectively, and the results showed that: the coefficient of recovery of collision, static friction factor, and rolling friction factor between the clam seedlings and EVA were 0.339, 0.538, and 0.205, respectively. For clam seedling-stainless steel plate interactions, these parameters were 0.128, 0.323, and 0.177, respectively. The inter-seedling contact parameters were determined by the suspension collision method with MXZ-1 type friction coefficient meter. Taking the inter-seedling contact parameters as test factors, taking the relative error between the experimentally measured and DEM-simulated angle of repose served as indexes, a three-factor three-level orthogonal test was carried out, and taking the minimum relative error as the optimization objective, the optimization analysis of the test data yielded the following results: the coefficients of recovery of the collision between the clam seedlings and the shellfish seedlings, the static friction factor, and the rolling friction factor were 0.170, 0.620, and 0.313, respectively. The validation test of the calibration results was carried out through the lifting cylinder method, and the results showed that the relative error between the simulated and experimentally measured angles of repose was 3.6%, which proved that the calibration results were true and reliable. This study filled the gap of discrete meta-parameter calibration of shifting beach quadrangular clam shellfish seedling, and provides theoretical basis for the optimization of key components, such as silo inclination angle, drop port position and impeller disc, for the intelligent seedling sowing equipment.

Keywords: intelligent seeding equipment; *Mactra veneriformis*; clam seedling; discrete elements; parameter calibration

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2023YFD2400800); Program of Liaoning Provincial Education Department (LJ232410158048)

First Author: LUAN Yuhang, E-mail: 1151681767@qq.com

* **Correspondence Author:** ZHANG Hanbing, E-mail: zhanghanbing@dlou.edu.cn