

基于离散元法的滩涂埋栖贝类仿生挖掘铲设计与试验

付善灿^{1,2} 王显明^{1,2} 常敬梓^{1,2} 黄冰^{1,2} 杨磊^{1,2} 吴海云^{1,2}
丁征亮^{1,3} 张涛³ 姜永成^{1,2}

(1. 天津农学院工程技术学院, 天津 300392; 2. 农业农村部智慧养殖重点实验室, 天津 300392;
3. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266000)

摘要: 针对传统滩涂埋栖贝类挖掘时存在的挖掘阻力大、作业效率低以及土壤扰动大等问题, 提出一种基于螃蟹步足特征的仿生挖掘铲设计方法, 旨在提升贝类采收的作业效能。首先, 通过三维扫描技术, 对螃蟹步足的形态结构、运动特性观测与分析, 提取出步足末端尖锐弧度、节段式表面肌理特征等仿生要素。其次, 以提取的仿生特征为核心设计依据, 结合滩涂土壤物理力学特性完成仿生挖掘铲的三维建模, 并通过离散元法 (DEM) 进行挖掘过程数值仿真, 分析仿生挖掘铲与滩涂底质土壤的作用规律及减阻特性。最后, 搭建室内试验台架, 开展挖掘速度、挖掘阻力和土壤扰动对比试验, 探究仿生挖掘铲的实际作业性能。仿真试验结果表明, 仿生挖掘铲的平均阻力为 151.42 N, 减阻率达 17.45%; 其平均土壤疏松度为 33.43%, 比平面挖掘铲减少 6.91%。开展土槽试验, 对比仿生挖掘铲与平面挖掘铲的滩涂挖掘作业性能, 测得二者挖掘阻力平均值分别为 162.41、189.27 N; 结果表明仿生挖掘铲相较平面挖掘铲在作业过程中的挖掘阻力与土壤疏松度分别降低 14.19% 和 4.98%, 实际减阻率与仿真试验结果相吻合, 满足滩涂埋栖贝类采收作业的减阻要求。

关键词: 仿生挖掘铲; 贝类收获机; 减阻特性; 土壤扰动; 离散元仿真

中图分类号: S972.69⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0134-12

OSID:



Design and Experiment of Bionic Digging Shovel for Tidal Flat Buried Shellfish Based on Discrete Element Method

FU Shancan^{1,2} WANG Xianming^{1,2} CHANG Jingzi^{1,2} HUANG Bing^{1,2} YANG Lei^{1,2} WU Haiyun^{1,2}
DING Zhengliang^{1,3} ZHANG Tao³ JIANG Yongcheng^{1,2}

(1. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China
2. Key Laboratory of Smart Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300392, China
3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266000, China)

Abstract: In view of the problems of high digging resistance, low operational efficiency and severe soil disturbance in the traditional harvesting of buried shellfish in tidal flats, a bionic digging shovel design method was proposed based on the bionic characteristics of crab pereopods, aiming to improve the operational performance of digging operations. Firstly, the morphological structures and motion characteristics of crab pereopods were observed and analyzed by means of 3D scanning technology, and key bionic elements such as the sharp curvature of the pereopod extremities and the segmented surface texture features were extracted. Secondly, the 3D structural modeling of bionic digging shovel was completed through integration of extracted bionic features and physicomechanical properties of tidal flat soil. Furthermore, numerical simulation of digging process was conducted via discrete element method (DEM) to analyze the interaction mechanism and drag reduction performance between bionic digging shovel and tidal flat sediment soil. Finally, a bench test device was established to carry out comparative tests on digging speed, digging resistance and soil disturbance, to investigate the actual operational performance of the bionic digging shovel. Simulation results showed that the bionic digging shovel had an

收稿日期: 2026-03-14 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2023CXGC010411) 和国家重点研发计划项目 (2023YFD2400800)

作者简介: 付善灿 (1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业机械化装备研究, E-mail: fushancan@163.com

通信作者: 姜永成 (1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业机械设计制造研究, E-mail: jiangyongcheng@tjau.edu.cn

average resistance of 151.42 N, with a drag reduction rate of 17.45%. Its average soil looseness was 33.43%, which was 6.91% lower than that of the flat digging shovel. Then, soil trench tests were performed to compare the digging performance of the two shovels, with the average digging resistance measured as 162.41 N and 189.27 N, respectively. Test results indicated that the bionic digging shovel decreased digging resistance and soil looseness by 14.19% and 4.98% compared with that of the flat digging shovel, and its actual drag reduction rate was consistent with the simulation results, meeting the drag reduction requirements for tidal flat shellfish harvesting.

Key words: bionic digging shovel; shellfish harvester; drag reduction characteristics; soil disturbance; discrete element simulation

0 引言

滩涂埋栖贝类作为我国水产养殖产业的主要品类之一,不仅具备显著的经济价值,更在维持近岸生态平衡、净化海水环境等方面发挥着重要的生态功能^[1-2]。当前,我国滩涂贝类采收作业主要采用人工挖掘与传统机械采收两种模式^[3]。虽然人工挖掘采收具有贝类损伤小、成品完好率高的优势,但是存在劳动强度大、作业效率低下、人力成本持续攀升等问题,已难以满足规模化养殖产业的高效采收需求。传统机械化采收设备多由旱地农业机械改良而成,未能针对滩涂特殊作业环境进行系统性优化设计^[4]。LI 等^[5]针对我国滩涂埋栖贝类机械化采收应用不足、采收理论研究匮乏的问题,设计了刷筛协同式滩涂埋栖贝类振动采收机,以滩涂养殖白蛤为研究对象,结合离散元法开展采收仿真试验,优化得到最优参数组合:振筛振幅 1.4 mm、一级毛刷转速 40 r/min、行进速度 10 m/min,采收效率 114 粒/m²、破碎率 6.97%,可实现低损完成贝类采收作业。但是滩涂底质土壤具有高含水率、高黏聚力等特征,导致传统设备作业时面临挖掘阻力较大、能耗居高不下的技术瓶颈^[6-7]。因此,针对滩涂黏性底质土壤工况下的贝类采收作业,研发具备减阻特性的挖掘铲,已成为实现滩涂埋栖贝类高效采收的技术关键。

曹成茂等^[8]针对宁前胡采挖作业中挖掘阻力过大的问题,以鲨鱼背鳍为仿生对象,设计了仿生挖掘铲,通过离散元仿真与土槽试验验证对比,该仿生挖掘铲比平面挖掘铲阻力减少 17.28%。张兆国等^[9]为解决三七收获过程中挖掘阻力显著、影响采收效率的问题,基于仿野猪头结构设计仿生挖掘铲,通过试验验证得到该仿生挖掘铲减阻率达 24.29%,减阻效果显著。张智泓等^[10]为破解深松机破土困难、耕作阻力大的核心问题,以砂鱼鳃头部为仿生原型,设计 B-S-1、B-S-2 和 B-S-3 共 3 种仿生深松铲尖,通过试验验证 B-S-2 型铲尖减阻效果最优,其减阻率为 8.34%~19.31%,满足

深松作业需求。TANG 等^[11]针对水稻田开沟器土壤阻力大、土壤扰动形态不合理的问题,以獾爪为仿生原型设计开沟器,借助 CFD-DEM 方法优化,该仿生开沟器可显著改善稻田作业中的土壤阻力与扰动状态,提升作业性能。ZHANG 等^[12]针对茶园土壤黏重导致深松阻力大、作业能耗高、犁底层破除困难的问题,以蜈蚣前足为仿生对象设计深松铲,通过试验得到该仿生挖掘铲减阻 24.53%,能耗降低 9.64%,同时提升了犁底层破坏效果。

相关研究^[8-12]为滩涂埋栖贝类采收装备的挖掘铲设计提供了相应理论基础,但滩涂底质环境具有含水率高、土壤黏性大等特性,且贝类埋栖深度存在差异,现有传统挖掘铲普遍存在挖掘阻力大、作业速度受限和土壤扰动过大等关键问题,严重制约了滩涂埋栖贝类机械化收获的规模化发展。挖掘铲作为滩涂埋栖贝类采收装备的关键执行部件,其结构形态、几何参数及表面特性直接决定装备的挖掘速度、阻力水平与土壤扰动。因此,针对传统挖掘铲阻力大、能耗高的技术瓶颈,亟需以生物高效运动与作业特性为仿生原型,开展基于特定生物结构的仿生挖掘铲设计,并与传统挖掘铲进行性能对比研究,探究兼具低阻力、低土壤扰动的仿生挖掘方案,实现挖掘性能的综合优化。

本文采用离散元法^[13-15],以埋栖贝类和滩涂底质土壤为试验对象,系统测定其机械物理参数。利用三维扫描技术采集螃蟹步足减阻的结构形态数据,设计仿生挖掘铲三维模型。采用离散元仿真与土槽试验相结合的方法,对比分析仿生挖掘铲和平面挖掘铲的力学特性及挖掘作业性能,重点研究其对挖掘速度、挖掘阻力及土壤扰动的影响规律,以解决滩涂底质土壤含水率高、黏性大而导致的挖掘阻力高的问题。

1 埋栖贝类-土壤离散元模型

1.1 埋栖贝类本征物理参数测定

为了保障挖掘作业性能测试结果的可靠性,以埋栖贝类为研究对象,筛选 15 只外表无破损、无畸

形的成员作为试验样本。采用游标卡尺分别对每只贝体的贝壳长度(最长轴)、宽度(最短轴)及厚度(径向尺寸)三轴尺寸进行测量。为消除单次测量误差,每项指标均独立重复测定3次,取对应数值的算术平均值作为单一样本的最终指标值,再计算15个样本的整体平均值,确保数据精准度。最终获得埋栖贝类三轴形态参数如表1所示,统计结果显示,样本贝体长度、宽度、厚度均值分别为45、33、24 mm,该数据为后续试验提供了有效数据支撑。

表 1 埋栖贝类三轴尺寸测量结果

Tab.1 Measurement results of triaxial dimensions for buried shellfish

组号	壳长	壳宽	壳厚
1	42	32	24
2	41	30	29
3	43	32	23
4	42	32	22
5	53	37	33
6	58	34	22
7	44	32	23
8	41	30	21
9	52	31	23
10	46	31	23
11	43	36	27
12	42	34	21
13	43	31	22
14	47	37	23
15	42	33	23
平均值	45	33	24

密度是贝类关键的物理特性,主要分为容积密度、粒子密度和真密度3种类型。容积密度的测量是通过将物料放入一定体积的容器中,由物料质量与容器体积计算得出。粒子密度的测量是基于物料的真实体积与质量得出。真密度的测定需先将物料粉碎去除内部孔隙,再通过剩余实体的质量与体积计算得出^[16]。物料密度的测量方法主要分为浸液法与气体置换法,二者原理一致,均通过测定物料排开介质的体积计算密度。其中,浸液法是将物料放入定量液体中,根据液面上升或排出液体的体积求解密度;气体置换法仅将介质替换为气体^[17]。考虑到浸液法更适配贝类的测定场景,本试验最终采用该方法。试验具体步骤如下:选取12个表面无损伤的贝类,先清洗去除贝类表面附着的淤泥,每3个为一组,共分为4组;采用天平测量每组贝类的质量;体积测定时,向烧杯中倒入适量纯净水,确保贝类完全浸没且无溢出,将贝类放入烧杯后,待液面稳定后记录刻度值,如表2所示。

表 2 埋栖贝类密度测量结果

Tab.2 Measurement results of density for buried shellfish

组号	贝体质量/ g	水体积/ cm ³	水和贝体 总体积/cm ³	贝体密度/ (g·cm ⁻³)
1	165.52	300	400	1.66
2	164.63	300	400	1.65
3	163.02	300	390	1.81
4	149.56	300	380	1.87

1.2 土壤离散元模型

土壤物理参数是影响挖掘装备受力特性与底质分离效能的重要因素,土壤物理参数的准确测定是贝类收获机构仿真分析的前提与基础。滩涂底质土壤参数测定的准确性不仅能提升仿真过程的有效性,还能确保仿真数据和实际作业工况的一致性,为挖掘机构设计的优化提供参考。本试验取样采用四点布设法采集土壤样本,沿垂直方向划分为上、中、下3层,最终获得土壤样本。此外,为进一步贴近真实作业环境,在滩涂底质离散元模型中嵌入贝类模型,实现土壤-挖掘铲-贝类的多体相互作用模拟。底质、挖掘铲和贝类的物理模型参数如表3所示^[18-22]。

表 3 底质、挖掘铲和贝类的仿真材料参数

Tab.3 Simulation material parameters of sediments, digging shovel and shellfish

参数	数值
底质泊松比	0.45
底质密度/(kg·m ⁻³)	1 040
底质剪切模量/Pa	1.0×10 ⁶
65Mn 钢泊松比	0.35
65Mn 钢密度/(kg·m ⁻³)	7 830
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.27×10 ¹⁰
贝类泊松比	0.25
贝类密度/(kg·m ⁻³)	2 970
贝类剪切模量/Pa	1.1×10 ⁷

1.3 贝类-土壤的离散元复合模型

本次试验所用底质土壤取自贝类收获期的养殖区,而贝类的埋栖生存范围主要集中在土壤表面以下0~60 mm区域。为使仿真试验结果更贴近真实作业场景,准确还原土壤-贝类-挖掘铲的相互作用过程,后续构建底质土槽仿真中加入贝类模型。传统建模方法多采用坐标点设定或手动导入模型的方式,这种方法对于形状不规则的颗粒模型存在一定弊端,不仅建模流程复杂、耗时较长,还容易因颗粒数量过多引发计算卡顿,甚至会导致仿真结果失真。本文选用EDEM离散元软件开展建模工作,该软件支持模型导入后的自动填充建模功能,结合前文测

得的贝类颗粒三轴参数,可高效完成贝类颗粒模型的构建。贝类的离散元建模,首先借助 Solidworks 软件完成贝类颗粒三维几何模型的构建并导出对应格式文件,随后对导出文件实施网格划分操作以生成满足仿真精度要求的网格模型,最后将网格模型导入 EDEM 离散元仿真软件,结合具体仿真需求选取适配的颗粒填充模型完成前处理配置(如图 1 所示)。

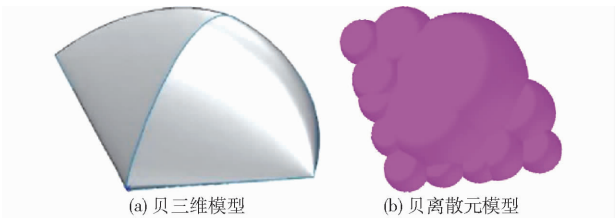


图 1 埋栖贝类三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of buried shellfish

图 2 所示为滩涂底质土壤离散元复合模型。埋栖贝类的分布深度范围为表层土至 60 mm 深度,且主要集中在 20 ~ 40 mm 区域。考虑到贝类收获机挖掘作业会对土壤产生扰动,为准确模拟贝类的真实滩涂生存环境,本文采用分层方式构建底质土壤离散元模型:设定底质土壤总深度为 120 mm,划分为上层底质、贝类层、下层底质 3 层,对应深度分别为 30、20、70 mm;底质模型的长、宽分别为 2 000 mm 和 500 mm,其中贝类层内设置贝类 1 500 枚。本文选用 EDEM 软件中的 Hertz Mindin 模型和 JKR 接触模型,用于模拟滩涂颗粒间的接触行为。底质、贝类和挖掘铲之间相互作用的仿真模型接触参数如表 4 所示^[21-23]。

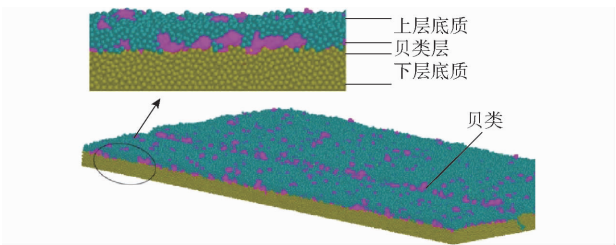


图 2 贝类-滩涂底质离散元复合模型

Fig. 2 Discrete element composite model for buried shellfish - tidal flat sediment

表 4 仿真模型接触参数

Tab. 4 Contact parameters of simulation model

项目	弹性恢复	静滑动摩擦	滚动摩擦
	系数	因数	因数
底质-底质	0. 42	1. 20	0. 11
底质-贝类	0. 10	0. 10	0. 30
贝类-贝类	0. 25	0. 37	0. 28
底质-65Mn 钢	0. 66	0. 70	0. 05
贝类-65Mn 钢	0. 31	0. 26	0. 34

2 挖掘铲整体结构设计

2.1 滩涂埋栖贝类挖掘铲设计

贝类收获机构的工作原理是通过挖掘铲切入滩涂底质以实现破土取贝功能,借助输送装置完成底质土壤与贝类的分离,最终通过收集装置实现贝类采收。传动系统可实现各功能装置的协同联动,保障作业过程的连续性与高效性。参考传统收获机的结构,结合滩涂埋栖贝类养殖环境及采收作业要求,设计的埋栖贝类收获机如图 3 所示。该收获机主要由挖掘装置、输送装置、收集装置、传动装置及固定架等部件组成。滩涂底质具有高含水率、高黏性的特性,土壤承载能力弱,常规牵引装置易发生下陷,严重影响作业效率。基于上述问题,该收获机选用插秧机作为牵引装置,并配备大直径翻板防陷轮,可通过防陷板结构增大前进方向的牵引力与下陷浮力,有效抑制作业过程中的下陷问题,能够很好地适配贝类养殖的滩涂底质环境。

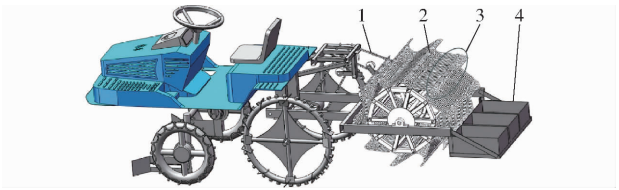


图 3 滩涂埋栖贝类收获机三维结构图

Fig. 3 Three-dimensional geometric structure of tidal flat buried shellfish harvester

1. 传动机构 2. 挖掘装置 3. 挖掘铲 4. 收集装置

埋栖贝类机械化采收成贝的作业中,需要考虑将幼贝回置于滩涂底质中,以保障贝类养殖的可持续发展。基于此需求,本文的挖掘铲装置采用带间距结构的挖掘铲。铲间间距是影响成贝与幼贝筛分效果的关键参数,间距过小会降低成贝采收效率,还会影响幼贝的筛分精度。为确定合理的铲间间距,需对埋栖成贝与幼贝的壳长、壳宽和壳高范围进行测量。通过三轴尺寸测量试验可得,成贝的壳长范围为 40 ~ 60 mm,壳宽范围为 30 ~ 50 mm,壳高范围为 20 ~ 40 mm;幼贝的壳长范围为 10 ~ 30 mm,壳宽范围为 8 ~ 20 mm,壳高范围为 2 ~ 10 mm。基于挖掘铲漏土特性与成贝-幼贝分级筛分功能的目标,本文最终选定 27 mm 作为挖掘铲的铲间间距参数。

为准确研究挖掘铲的动态作业过程及与滩涂底质的相互作用规律,本文采用 EDEM 软件开展滚动式贝类收获机挖掘过程仿真试验(如图 4 所示)。挖掘初期,挖掘铲前端铲尖先接触滩涂底质,从而造成前端土壤的局部扰动,随挖掘铲持续下行,其与底质土壤的接触面积逐步扩大,能量向底质深层传导,

底质颗粒的运动幅度显著增强。当到达挖掘中期时,挖掘铲的铲尖完全进入底质土壤中并达到作业最低点,此时挖掘铲与底质土壤的相互作用最强,底质的剪切与推移效应最为明显。当到达挖掘后期时,挖掘铲进入出土阶段,挖掘铲铲尖随滚轮转动与整机前移逐步脱离底质,首个挖掘铲完成出土,第2个挖掘铲随即切入底质开启下一轮循环作业。在此过程中,附着于挖掘铲表面的底质颗粒随辊轮旋转通过铲间间隙脱落,实现底质与贝类的初步分离,成贝因尺寸大于铲间间隙被拦截,并随辊轮转动输送到收集装置中。

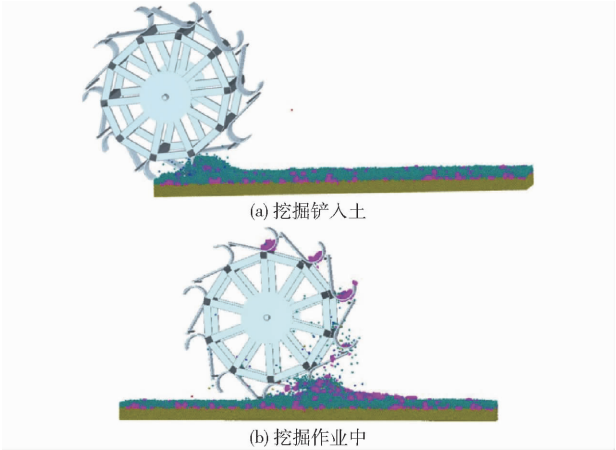


图4 埋栖贝类采收仿真试验
Fig.4 Simulation experiment for buried shellfish harvesting

2.2 螃蟹步足三维建模

蟹类广泛分布于各类江河湖泊水域,是典型的底栖水生生物,具备较强的长途迁徙能力。其步足兼具步行移动与沙土潜行双重功能,结构坚韧且运动灵活,在底栖活动中与土壤介质充分接触,可凭借独特的运动姿态实现高效破土、翻土作业(如图5所示)。研究表明,蟹类步足入土时的入土角参数、土壤中运动轨迹及受力特征,与滩涂贝类机械化采收场景中挖掘铲的入土作业需求高度适配。基于这一关键特性,本文选取蟹类步足作为仿生研究核心对象,通过准确复刻其体表结构和运动特征,优化挖掘铲结构设计,最终实现挖掘铲作业时的减粘、脱附、降阻的设计目标,为提升贝类采收效率提供技术支撑。

本文所选用的螃蟹样本在天津市某水产市场采购,仿生对象为螃蟹步足。由于直接扫描整只螃蟹会导致步足细节模糊,难以获取高精度模型,因此应



图5 螃蟹步足实物图
Fig.5 Photograph of crab pereiopods

先对步足模型进行精细化着色处理,从而增强其外形轮廓的可视化效果。完成优化后将步足模型存储为 STL 格式,该格式可兼顾模型的完整性与样本原始结构特征的留存。在此基础上,利用三维建模软件提取模型中心处的特征曲线,为仿生挖掘铲的创新设计提供数据依据。

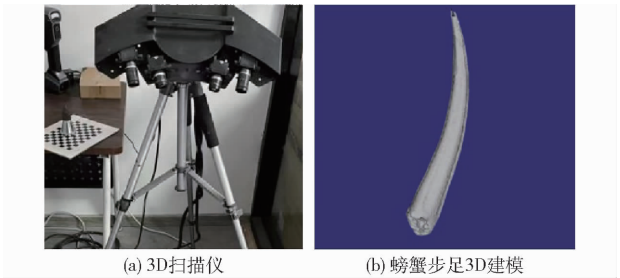


图6 螃蟹步足三维扫描建模图
Fig.6 Three-dimensional scanning and modeling of crab pereiopods

若直接将螃蟹步足应用于仿生挖掘铲的设计中,小尺寸难以匹配贝类采收的实际作业需求,易导致贝类遗漏,无法实现完整采收。因此,本文采用最小二乘法^[24]对螃蟹步足的特征曲线进行拟合分析:首先借助三维软件输出步足中心曲线的关键坐标,再使用这些坐标点经最小二乘法进行计算,最终得到完整的特征曲线。该拟合曲线方程为: $y = -0.17x^2 + 1.92x + 26.83$,拟合曲线决定系数达0.97,说明曲线拟合精度高,能够准确复刻螃蟹步足的结构特征,可为贝类仿生挖掘铲的结构设计提供可靠的理论依据。

2.3 滩涂埋栖贝类仿生挖掘铲设计

本试验基于三维扫描仪获取的步足模型,提取其生物几何特征融入贝类挖掘铲的设计,使仿生挖掘铲具备该步足的减阻形态优势。以螃蟹步足为原型,基于功能导向的设计原则,专注于仿生形态对挖掘作业性能的提升。滩涂贝类采收中,挖掘深度直接决定贝类采收完整性,挖掘铲与土壤的接触阻力受入土角度和挖掘深度的调控。同时,将仿生挖掘

铲的主体设计为圆弧状,使土壤所受合力形成与挖掘前进方向相反的反向分力,可有效抑制壅土现象,提升贝类收获机的作业稳定性与采收质量(如图 7 所示)。

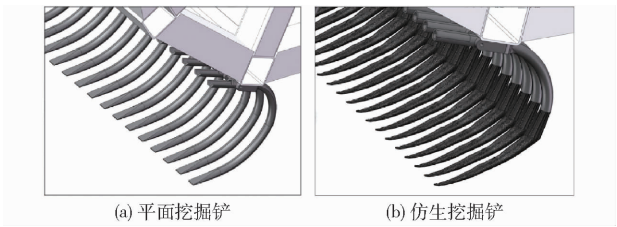


图 7 滩涂埋栖贝类挖掘铲三维图

Fig. 7 Three-dimensional model of digging shovel for tidal flat buried shellfish

挖掘深度的设计源于贝类实际的埋栖深度,在贝类成熟采收季的养殖区采用随机四点布设法进行采样,测量得到贝类埋栖深度范围为 0 ~ 60 mm。考虑到滩涂土壤高含水率、高黏聚力的特性,挖掘阻力和挖掘深度呈正相关,设计需要兼顾贝类采收与阻力最小化的双重目标。本文仿生挖掘铲圆弧结构设计呼应螃蟹步足拟合曲线特征,既能覆盖贝类埋栖范围,又能通过弧形结构分散土壤压力,为减阻提供机械结构支撑。

3 挖掘铲力学分析

在滩涂贝类采收作业中,挖掘铲的主要功能在于克服滩涂底质土壤颗粒间的粘结作用,借助外力使颗粒间物理化学粘结键发生分离、断裂或破解,进而实现挖掘铲与底质土壤的有效脱离。由于滩涂底质土壤具备高含水率、高粘结性及孔隙率不均等特殊物理力学属性,挖掘过程中挖掘铲与底质的相互作用机制较为复杂,这一复杂性直接制约采收效率的提升与能耗的优化控制。因此,构建挖掘铲的力学模型并系统剖析挖掘阻力的构成来源,成为优化挖掘机构设计的关键理论支撑^[25]。

挖掘作业时,挖掘铲以设定的切削角度切入滩涂底质,切削区域内的土壤不仅承受挖掘铲施加的法向压力,还受到其切向切削力的作用。同时,底质土壤自身重力、颗粒间内摩擦力及与铲面间外摩擦力也会形成综合作用效应(如图 8 所示)。在上述复杂力系的耦合影响下,挖掘铲前端面作为核心受力区域,极易因局部应力集中引发剪切失效,具体表现为铲面磨损、变形乃至结构性损伤,进而严重影响作业稳定性与设备服役寿命。从力学平衡角度分析,挖掘铲所受总力为多力系的矢量合成结果,主要由铲尖切削段与铲面承载段的受力共同构成。铲尖作为直接切削执行部件,主要承受土壤的切削阻力、

黏结阻力及颗粒碰撞冲击力。同时,土壤自身重力与颗粒间摩擦力会通过土-铲相互作用转化为对铲尖的反向作用力,与前述黏结阻力、颗粒碰撞冲击力叠加后作用于铲前端面,这也是引发其剪切失效的关键原因。通过系统的受力分析与推导,最终得到挖掘过程中铲尖在水平方向与垂直方向的受力平衡方程为

$$\begin{cases} N_1 \sin \varphi + K S_c \cos \varphi - \mu N_1 \cos \varphi = 0 \\ N_1 \cos \varphi + \mu N_1 \sin \varphi - K S_c \sin \varphi - G_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 N_1 ——铲尖上方土壤受到前失效面压力, N
 G_1 ——铲尖土壤和贝类复合物的重力, N
 φ ——土壤前失效倾角, (°)
 μ ——土壤与挖掘铲摩擦因数
 K ——土壤内聚力, MPa
 S_c ——铲尖剪切土壤面积, mm²

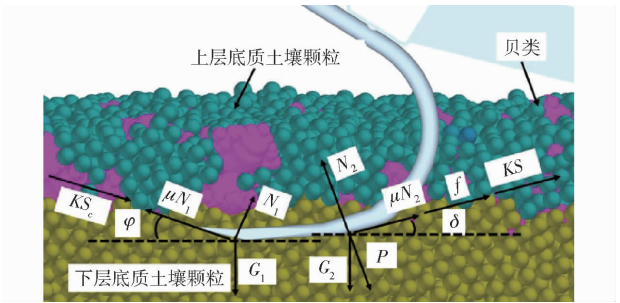


图 8 挖掘铲受力分析图

Fig. 8 Analysis of forces on digging shovel

铲面是挖掘铲实现动力传递与姿态平衡的核心承载部件,其受力状态直接决定铲体作业的稳定性和可靠性。从受力传递路径来看,铲面所承载荷首先来自铲尖切削段的直接传递——铲尖与土壤相互作用产生的反作用力会通过铲体刚性结构传导至铲面,形成沿铲面均布的压力与切向力。同时,铲体自身重力不可忽视,尤其在滩涂松软底质环境中,铲面自重会通过接触面向土壤施加竖向压力,这一压力与土壤对铲面的支撑力形成竖向受力平衡。此外,铲面与挖掘设备主机的装配连接处会产生约束反力,该反力用于抵消铲尖传递的水平载荷与竖向载荷,避免铲体发生偏移或扭转,确保挖掘轨迹的准确性。

在挖掘作业的动态过程中,铲面受力始终处于动态平衡状态。当挖掘铲以设定的入土角切入土壤时,铲面上方的土壤与贝类复合物会因铲体的推进产生沿铲面向上的运动趋势,进而对铲面施加反向的压力与摩擦力;而挖掘装置施加的挖掘力则沿铲面方向向上,用于克服复合物的重力分力与摩擦阻力。通过对铲面受力的系统分析,可明确各力之间的平衡关系,最终得出铲面上方土壤在水平方向与

垂直方向的受力平衡方程分别为

$$\begin{cases} P\sin\delta + (KS + f + \mu N_2)\cos\delta - N_2\sin\delta = 0 \\ N_2\cos\delta + (KS + f + \mu N_2)\sin\delta - P\cos\delta - G_2 = 0 \end{cases}$$

(2)

式中 G_2 ——铲面土壤和贝类复合物的重力,N
 P ——挖掘铲面掘起土壤和贝类所用的力,N
 N_2 ——铲面上方土块受到的压力,N
 δ ——挖掘铲铲面倾角,(°)
 S ——铲面剪切土壤面积,mm²
 f ——铲面受到的纯切削力,N

在滩涂埋栖贝类机械化采收作业过程中,挖掘铲的入土切削与贝类-土壤混合体推移是决定作业效果的关键工序,而对挖掘阻力的量化与作用机制分析,是保障作业系统高效稳定运行的重要前提。滩涂土壤具备高含水率、高黏聚力的典型特征,且存在贝类与土壤间的复杂相互作用,容易导致挖掘过程中阻力突变、峰值显著升高,不仅会明显增加动力系统能耗,还可能引发铲体结构塑性变形、作业轨迹偏移等一系列问题,最终制约采收效率提升,影响设备长期稳定运行。因此,明确挖掘铲阻力的构成机制、建立准确的量化模型,是突破滩涂机械化采收技术瓶颈的关键科学问题。这一研究既是判断挖掘设备负载适配性的重要参考,也是后续开展铲体结构仿生优化、作业参数匹配及减阻技术研发的理论基础。结合上述研究目标与技术需求,分析挖掘铲与滩涂贝类-土壤混合体的动态相互作用规律后发现,挖掘铲所受总阻力并非单一类型的作用力,主要由土壤颗粒间内摩擦力、贝类与土壤界面粘结力等多种阻力构成,其表达式为

$$F = KS' + f' + \mu N' - G\sin\theta$$

(3)

式中 F ——挖掘铲所受阻力,N
 G ——挖掘铲掘起土壤和贝类所用的力,N
 N' ——挖掘铲上方土块受到的压力,N
 θ ——挖掘铲倾角,(°)
 S' ——挖掘铲剪切土壤面积,mm²
 f' ——挖掘铲受到的纯切削力,N

实际作业中,挖掘铲的阻力大小直接关系能耗水平与作业效率,不同结构设计(如仿生挖掘铲与传统平面挖掘铲)或作业参数下的阻力差异,需要通过具体指标量化呈现减阻效果。减阻率是用于衡量不同工况下挖掘铲减阻性能的关键指标,这一指标的计算以挖掘阻力为核心依据,通过对比基准阻力与优化后阻力的差值占比,直观反映减阻措施的实际效用。为了评估挖掘铲的减阻效果,采用减阻率计算公式为

$$\eta = \frac{F_p - F_f}{F_p} \times 100\%$$

(4)

式中 η ——减阻率,%
 F_p ——平面挖掘铲的挖掘阻力,N
 F_f ——仿生挖掘铲的挖掘阻力,N

4 离散元仿真

4.1 挖掘速度

图9所示为仿生挖掘铲与平面挖掘铲的土壤颗粒速度场图。从整体速度场分布来看,在滩涂土壤作业过程中,仿生挖掘铲与平面挖掘铲的土壤颗粒速度场呈现出显著差异。仿生挖掘铲对应的速度场中,土壤颗粒速度大的覆盖范围更广,其速度高于1.56 m/s的高速区域面积占扰动区域的32.62%。铲体切削刃附近及土壤被扰动的核心区域,颗粒速度普遍处于1.56~2.60 m/s的较高区间,且该高速区域向周围土壤延伸的距离更长,同时土壤颗粒速度矢量的方向更分散,既有沿铲面的滑移分量,也有垂直铲面的旋转分量,体现出土壤被充分破碎后的多维运动特征。而平面挖掘铲的速度场中,土壤颗粒速度小的区域占比大幅增加,仅在铲刃最前端的极小范围内出现局部高速,其速度高于1.56 m/s的高速区域面积占比仅为7.56%,大部分土壤颗粒的速度集中在0.52~1.56 m/s区间,且速度矢量的方向性更单一,多沿铲面推进方向呈整体推移状态,远离铲刃的区域迅速回落至0.52 m/s以下的低速度区间。此外,仿生铲速度场的速度梯度更陡峭,从铲刃高速区向周围土壤低速度区的过渡更快,反映出土壤颗粒的动能传递效率更高,平面铲的速度梯度相对平缓,动能的传递范围与强度均明显受限。

出现这一差异的主要原因在于两种铲体的结构特征与滩涂土壤力学特性的适配性不同。仿生挖掘铲采用仿螃蟹步足的表面肌理结构,其非规则切削界面大幅减少了与滩涂高黏性土壤的实际接触面积,破坏了土壤在铲面形成稳定粘附层的力学条件,使土壤颗粒能够沿铲面快速滑移,减少了摩擦阻力对颗粒动能的消耗。仿生结构的分段式切削特性,将滩涂土壤的整体剪切转变为局部的挤压、破碎和推进交替作用,促使土壤团聚体提前破碎为小颗粒,颗粒间的碰撞频率与动能传递效率显著提升,从而形成大范围高速区域。而平面挖掘铲的光滑平整界面与滩涂土壤呈连续面接触,高含水率的滩涂土壤易通过分子间作用力和毛细作用在铲面形成致密粘附层,既增大了颗粒滑移的摩擦阻力,也使土壤以整体推移为主,仅在铲刃直接切削区域产生局部高速,后续动能迅速被粘附和摩擦作用消耗,难以向周围

土壤传递。同时,仿生铲的流线型曲面引导颗粒运动方向更分散,形成多维速度分量的叠加。平面铲的直线型切削面限制了颗粒运动维度,速度矢量多沿单一方向,难以形成速度叠加效应,因此呈现出单一的速度特征。

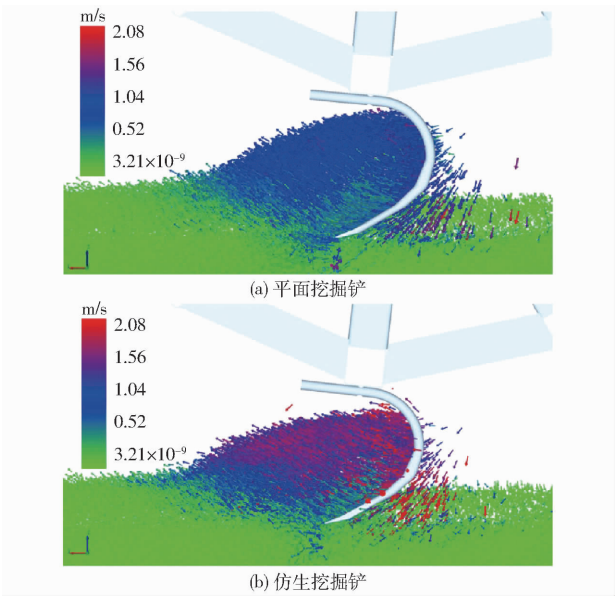


图 9 挖掘作业中土壤颗粒速度场

Fig. 9 Soil particle velocity field in digging operation

4.2 挖掘阻力

图 10 所示为仿生挖掘铲与平面挖掘铲的阻力对比图,结合滩涂高黏、松软且贝类埋栖深度分布的范围,仿生挖掘铲与平面挖掘铲的受力表现差异更能体现其环境适配性。仿生挖掘铲平均阻力为 151.42 N,减阻率为 17.45%。当挖掘深度为 40 mm 时,受表层土壤轻度黏结但易壅积的影响,仿生挖掘铲的阻力仅 82.21 N,较平面挖掘铲的 114.34 N 降低 28.10%,更适配滩涂松软表层的快速作业,既能降低破土阻力,也避免了表层黏土堆积阻滞作业节奏。而在挖掘埋栖深度为 60 mm 时,该深度是滩涂埋栖贝类的主要分布区,面对黏重的滩涂中层土壤,仿生挖掘铲的阻力为 157.35 N,平面挖掘铲的阻力为 187.23 N,在保证滩涂贝类收获率稳定的前提下,仿生挖掘铲减阻率为 15.96%,且因带出土壤量更少,可减少滩涂贝类栖息微环境的扰动。当作业至滩涂 80 mm 的深层区域时,受滩涂深层土壤高黏度淤积的影响,土壤粘结阻力显著攀升,此时仿生挖掘铲的阻力为 223.65 N,平面挖掘铲的阻力为 247.23 N,仿生挖掘铲土壤粘附量更少的特性,在滩涂深淤区域更能缓解阻力陡增的问题,适配滩涂深层作业的高负载需求。

仿生挖掘铲与平面挖掘铲的水平阻力对比如图 11a 所示。随挖掘深度从 40 mm 增至 80 mm,仿

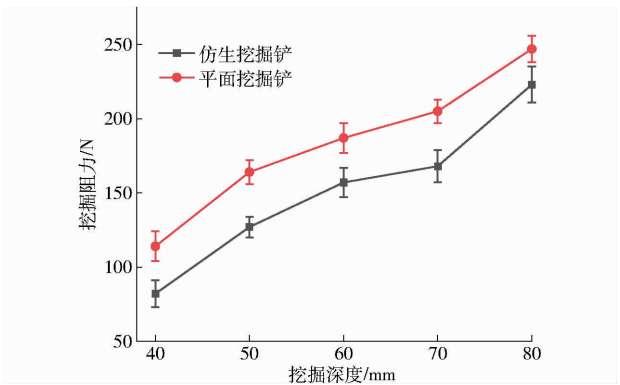


图 10 挖掘作业中阻力对比曲线

Fig. 10 Resistance comparison curves during digging shovel operation

生挖掘铲与平面挖掘铲的水平阻力均呈逐步递增趋势,但仿生挖掘铲在各深度下的水平阻力始终显著低于平面挖掘铲。当挖掘深度为 40 mm 时,仿生挖掘铲的水平阻力为 67.37 N,平面挖掘铲水平阻力达 82.53 N,仿生挖掘铲较平面挖掘铲降低 18.37%。在贝类集中栖息的 60 mm 深度,仿生挖掘铲的水平阻力为 127.73 N,平面挖掘铲的水平阻力为 153.53 N,降幅 16.80%。当挖掘深度为 80 mm 时,仿生挖掘铲的水平阻力为 175.43 N,仍较平面挖掘铲的 192.56 N 降低 8.90%。这一差异源于仿生挖掘铲对螃蟹步足尖锐弧度与节段式表面肌理特征的仿生设计,铲尖缩减了与滩涂高粘结土壤的接触面积,节段式表面肌理能有效割裂土壤与铲体的连续粘附层,避免形成大面积粘附层带来的附加阻力,从而降低水平方向的摩擦阻力与壅土阻力。而平面挖掘铲宽而光滑的铲面易与土壤形成连续粘附层,缺乏纹理辅助减阻,导致水平摩擦阻力与土壤堆积产生的附加阻力大幅增加。

图 11b 所示为仿生挖掘铲与平面挖掘铲的垂直阻力对比图。由图可知,挖掘铲垂直受力呈现相似的变化规律。当挖掘深度为 40 mm 时,仿生挖掘铲的垂直阻力为 45.31 N,平面挖掘铲的垂直阻力为 53.63 N,降低 15.51%。当挖掘深度为 60 mm 时,仿生挖掘铲的垂直阻力为 70.37 N,较平面挖掘铲的 82.36 N 降低 14.56%。当在 80 mm 深层作业时,仿生挖掘铲的垂直阻力为 84.27 N,仍较平面挖掘铲的 89.15 N 减少 5.47%。这主要是因为仿生挖掘铲的圆弧状结构设计,能够将垂直方向的土壤压实反力部分分解为沿铲面的水平分力,实现载荷的有效分散,同时尖锐铲尖具备更强的穿刺效应,入土时无需克服大面积土壤的压实阻力,进而显著降低垂直受力。而平面挖掘铲采用刚性平面设计,无法实现力的有效分解,垂直方向需直接承载土壤的压实反力,加之其带土量更多,进一步推高了垂直载荷,

导致各深度下的垂直力均高于仿生挖掘铲。

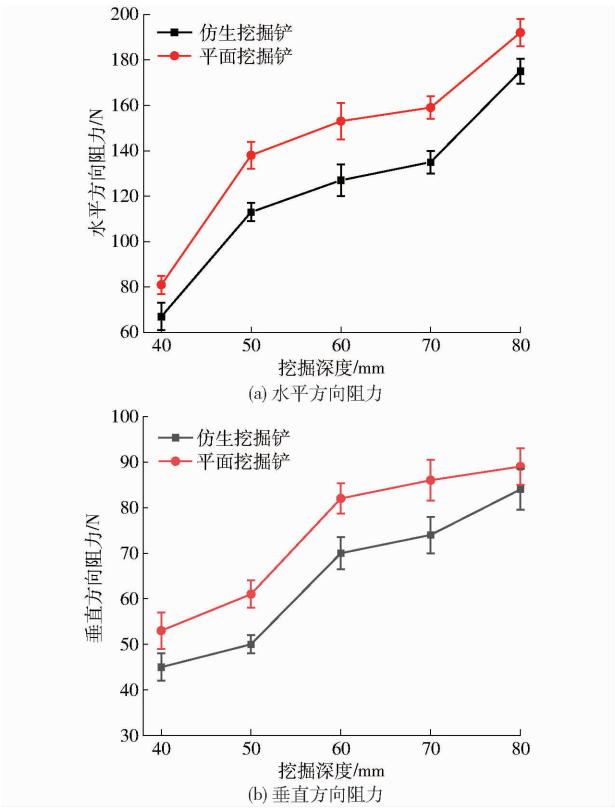


图 11 挖掘作业中水平阻力和垂直阻力对比曲线
Fig. 11 Comparison curves of horizontal and vertical resistance during digging operation

4.3 土壤疏松度

在滩涂埋栖贝类机械化采收作业体系中,挖掘铲的入土切削与贝类-土壤混合体推移是主导作业效能的关键步骤。土壤扰动是评估作业性能的重要维度,其效果的精准量化直接决定采收技术方案的优化方向。在土壤扰动效果的量化指标中,土壤疏松度是关键指标,可直观反映表层土壤松动状态,对其进行定量表征,不仅有助于采收效能优化,而且对评估作业带来的底质生态破坏风险具有重要工程价值。

土壤疏松度定义为挖掘铲作业后表层顶部与表层以下土壤颗粒数量或质量比值,既表征表层土壤隆起疏松程度,也能间接反映土壤扰动在表层区域的作用效果。土壤疏松度偏高时会破坏底栖生物栖息地的完整性。滩涂底质是小型无脊椎动物、微生物及贝类幼体的核心栖息与繁衍场所,其稳定的颗粒结构、孔隙分布为生物提供了觅食、避敌、附着的必要环境。土壤过度疏松会导致表层底质结构破坏,原有栖息洞穴坍塌、微生物境碎片化,大量底栖生物因栖息地破坏而死亡或迁移,打破滩涂生态链平衡。底质土壤疏松度 b 的计算公式为

$$b = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \tag{5}$$

式中 n_1 ——底质土壤扰动后表层下面的土壤颗粒数量
 n_2 ——底质土壤扰动后表层上面的土壤颗粒数量

图 12 所示为仿生挖掘铲与平面挖掘铲在不同挖掘深度下的土壤疏松度对比结果。挖掘铲的土壤疏松度均呈上升态势,但仿生挖掘铲在各深度下的指标均低于平面挖掘铲。从不同作业深度的测试结果来看,仿生挖掘铲在改善土壤疏松度方面呈现出稳定的优势。在 40 mm 浅层工况下,仿生挖掘铲的土壤疏松度为 25.67%,而平面挖掘铲的疏松度为 26.34%,相对降低 2.54%。当深度达到 60 mm 时,两者的差异最为显著,仿生挖掘铲与平面挖掘铲的疏松度分别为 31.21% 和 34.50%,仿生挖掘铲降约 9.54%。进一步增加至 80 mm 深层作业时,仿生挖掘铲的土壤疏松度为 44.84%,仍低于平面挖掘铲的 49.55%,降幅为 9.51%。随挖掘深度从 40 mm 增至 80 mm,仿生挖掘铲平均土壤疏松度为 33.43%,比平面挖掘铲减少 6.91%。上述结果表明,随着作业深度增加,仿生挖掘铲能持续保持较低的土壤疏松效果,具有明确的性能优势。这一差异源于仿生挖掘铲表面带有仿生表面肌理特征,且主体做成圆弧形,前者能打破土壤与铲体的连续粘结,后者可引导土壤平缓滑移,避免过度扰动。

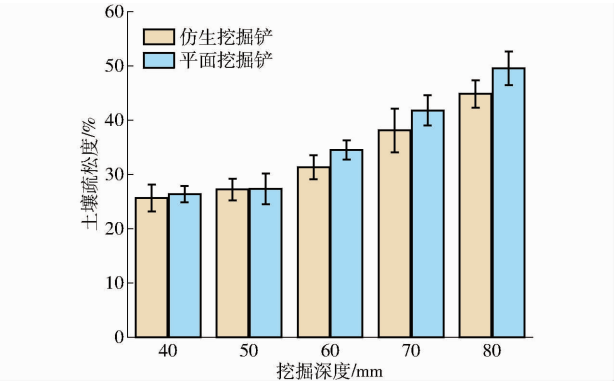


图 12 挖掘作业中土壤疏松度对比图
Fig. 12 Comparison of soil looseness during digging operation

5 台架试验

5.1 试验方案

为明确仿生挖掘铲相较于传统平面挖掘铲的作业性能优势,本研究开展台架对比试验,重点测试挖掘阻力和减阻效率的关键指标,所得数据为后续滩涂现场试验及结构优化提供基础支撑。该试验以滩涂挖掘作业的实际工况为基准,通过模拟滩涂试验环境,消除复杂野外条件干扰,实现两种挖掘铲性能的量化对比。试验采用基于工业铝型材搭建的室内滩涂台架试验平台,该平台集成传感检测、动力传

输、运动控制等,可有效模拟滩涂挖掘作业的力学环境与运动特征(如图 13 所示)。该试验台主要包括:力传感器,用于实时采集挖掘过程中的载荷信号;倾角传感器,用于同步监测挖掘铲的作业姿态参数;传动机构,用于实现挖掘轨迹与作业速度的准确控制。

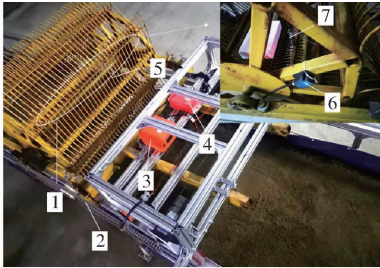


图 13 台架试验装置
Fig. 13 Bench test device

1. 挖掘装置 2. 传动机构 3. 电源 4. 控制器 5. 挖掘铲
6. 倾角传感器 7. 力传感器

试验参数设定参照典型滩涂作业工况,土壤样本经过筛分等预处理后,严格控制含水率在 25% ~ 30% 区间,且试验所用的土壤类型为沙泥滩涂底质,以模拟真实滩涂底质土壤特性。为覆盖埋栖贝类的生存深度范围,试验过程中将两种不同结构类型的挖掘铲分批安装于试验台执行机构,完成力与角度传感器的零点校准,确保数据采集可靠性。试验土槽填充预处理后的土壤样本,静置 24 h 使土壤颗粒充分沉降,保证土壤状态均匀稳定。按预设挖掘深度与前进速度组合工况依次进行试验,各工况重复 3 次,取测量均值以降低系统随机误差。通过运动与传动系统协同控制,经数据采集系统实时运算处理后获取挖掘阻力等参数,并对采集数据进行整理分析。

5.2 试验结果

试验以栖息贝类的滩涂土壤为研究对象,旨在准确对比仿生挖掘铲与平面挖掘铲的作业特性(如图 14 所示)。根据贝类的埋栖深度,试验同步测定各深度下的挖掘阻力与土壤疏松度,该指标用于量化两类挖掘铲对土壤的扰动效果差异。表 5 所示为平面挖掘铲和仿生挖掘铲的台架试验测量结果,共进行了 12 组测试试验。40 mm 的埋栖深度时,仿生挖掘铲凭借仿生纹理展现出显著减阻优势,其挖掘阻力仅为 97.23 N,而平面挖掘铲因铲面光滑,与土壤接触面积大且无纹理辅助减阻,阻力高达 121.04 N,仿生挖掘铲减阻率达 19.67%。仿生表面肌理结构有效割裂土壤与铲体的粘结面,减少接触阻力的同时,也避免土壤因铲面过度挤压隆起,而平面挖掘铲表面光滑易形成连续的土壤粘附层,增大挖掘阻力。

60 mm 的挖掘深度时,仿生挖掘铲弧形铲面与仿生纹理的协同作用凸显,阻力低至 159.48 N,平面挖掘铲则因刚性铲面无法引导土壤有序运动,挖掘阻力攀升至 196.13 N,减阻率升至 18.69%,弧形结构可引导土壤平缓滑动,进一步降低挖掘阻力。80 mm 深层作业时,仿生挖掘铲结构优势仍得以维持,挖掘阻力为 245.81 N,平面挖掘铲因深层土壤压力叠加自身结构缺陷,挖掘阻力达 260.09 N,减阻率为 5.49%,仿生纹理与弧形铲面共同抑制深层土壤坍塌带来的阻力增幅,平面挖掘铲则因挖掘阻力过高导致作业能耗增加。



(a) 平面挖掘铲



(b) 仿生挖掘铲

图 14 挖掘作业中挖掘铲实物图
Fig. 14 Photograph of digging shovel during digging operation

对于不同埋栖深度的挖掘作业,仿生挖掘铲的结构设计同样降低了土壤疏松度,使其更适配滩涂贝类作业需求。40 mm 的埋栖深度时,仿生挖掘铲仿生表面肌理结构可避免土壤过度堆积,土壤疏松度为 18.18%,而平面挖掘铲因光滑铲面无法分散土壤受力,导致土壤无序堆积,土壤疏松度升至 21.12%,过高疏松度会造成底质土壤结构松散,破坏贝类赖以生存的浅层栖息微环境。60 mm 的埋栖深度时,仿生挖掘铲弧形铲面引导土壤平缓运动,土壤疏松度控制在 32.13%,较传统挖掘铲降低 11.31%。平面挖掘铲则因刚性挖掘造成土壤扰动过度,土壤疏松度飙升至 36.23%。80 mm 的深层作业时,仿生挖掘铲结构可维持土壤适度疏松,土壤疏松度为 45.52%,节段式表面肌理结构能有效分割深层土壤团聚体,避免土壤致密化或过度疏松,平面挖掘铲则因阻力过高导致深层土壤扰动失衡,土壤疏松度达 48.16%,过高疏松度容易破坏土壤中

贝类觅食所需的微生物环境,不利于贝类生长繁衍。与传统平面铲相比,仿生挖掘铲作业后的平均土壤疏松度降低了 4.98%。综上,仿生挖掘铲弧形铲面与节段式表面肌理结构的组合设计,在不同栖息深度下均实现了较小的挖掘阻力与较低的土壤疏松度,能够满足滩涂贝类机械化采收的实际技术要求。

表 5 土槽对比试验阻力测量结果

Tab. 5 Resistance measurements result for soil trench comparison tests			
试验序号	仿生挖掘铲 阻力 F_p /N	平面挖掘铲 阻力 F_f /N	减阻率 η /%
1	163.17	191.07	14.60
2	156.38	182.16	14.15
3	164.93	193.78	14.89
4	159.01	184.57	13.85
5	171.60	198.91	13.73
6	151.70	179.63	15.55
7	162.83	189.00	13.85
8	158.96	185.73	14.41
9	157.59	183.78	14.25
10	159.68	182.04	12.28
11	179.89	207.96	13.50
12	163.09	192.64	15.34
均值 ± 标准差	162.41 ± 7.20	189.27 ± 8.36	14.19 ± 0.85
变异系数/%	4.43	4.42	6.00

6 结论

(1)以螃蟹步足为仿生原型,通过三维扫描与特征拟合技术,提取步足末端尖锐弧度、节段式表面

肌理特征等核心仿生要素,结合滩涂高含水率、高黏聚力的土壤特性及贝类埋栖规律,设计出仿生挖掘铲。该设计突破传统平面挖掘铲结构适配性不足的瓶颈,通过形态优化实现挖掘阻力降低与土壤扰动减小的双重目标,综合作业性能显著优于传统挖掘铲,为滩涂贝类机械化采收设备的挖掘装置升级提供了技术支撑。

(2)基于 EDEM 软件开展的离散元仿真试验,系统验证了仿生挖掘铲的减阻与土壤扰动性能。仿真结果表明,随挖掘深度从 40 mm 增至 80 mm,仿生挖掘铲在各工况下均保持稳定优势,相较传统平面挖掘铲,仿生挖掘铲的平均阻力为 151.42 N,减阻率达 17.45%;仿生挖掘铲的平均土壤疏松度为 33.43%,比平面挖掘铲减少 6.91%。仿生挖掘铲的弧形结构可分散土壤压力,节段式表面肌理结构能割裂土壤粘结层,二者协同作用优化了铲体与滩涂底质的相互作用机制,为后续台架试验提供了数值理论依据。

(3)室内台架对比试验进一步证实了仿生挖掘铲的应用价值,试验结果与仿真数据相契合,验证了设计的可靠性。传统平面挖掘铲平均挖掘阻力为 189.27 N,仿生挖掘铲平均阻力降至 162.41 N,平均减阻率为 14.19%,土壤疏松度降低 4.98%。在 60 mm 挖掘深度时,仿生挖掘铲弧形铲面引导土壤平缓运动,土壤疏松度控制在 32.13%,较传统挖掘铲降低 11.31%,满足滩涂埋栖贝类机械化采收的实际作业需求。

参 考 文 献

[1] ZHOU Cong, XU Li, SONG Hao, et al. The regulation of energy metabolism, antioxidant response, and ammonia detoxification in hard clam, *Mercenaria*, under hypersalinity stress[J]. *Aquaculture*, 2023, 563(1): 738916.

[2] WANG Yaxin, WU Haiyun, HUA Xiuping, et al. Biological characters identification for hard clam larva based on the improved YOLOX-s[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 212: 108103.

[3] WANG Yuhang, LI Dongdong, ZHANG He, et al. Transcriptome analysis of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) under *Vibrio parahaemolyticus* challenge in a low-salinity environment provides molecular insights into immune response [J]. *Aquaculture*, 2024, 548: 740681.

[4] SAUREL C, FERREIRA J G, CHENEY D, et al. Ecosystem goods and services from Manila clam culture in Puget sound: a modelling analysis[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2014, 5(3): 255 – 270.

[5] LI Hangqi, MU Gang, ZHANG Guochen, et al. Design and testing of a mechanized brush-screen cooperative vibration harvester for mudflat-buried shellfish based on the discrete element method[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1134888.

[6] LI Hangqi, MU Gang, LI Xiuchen, et al. Design and testing of the clam vibration harvester's V-shaped double-spiral harvesting roller brush based on DEM – MBD[J]. *Aquacultural Engineering*, 2025, 111: 102582.

[7] 吴昊, 张国琛, 李航企, 等. 链齿-犁式浅海底播菲律宾蛤仔采收机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(10): 71 – 81.

WU Hao, ZHANG Guochen, LI Hangqi, et al. Design and experiment of chain tooth-plow subtidal bottom-sown manila clam harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(10): 71 – 81. (in Chinese)

[8] 曹成茂, 刘忠滨, 丁武阳, 等. 宁前胡仿生挖掘铲设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(11): 102 – 112.

CAO Chengmao, LIU Zhongbin, DING Wuyang, et al. Design and experiment of ning-guo radix peucedani bionic digging shovel [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(11): 102 – 112. (in Chinese)

[9] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(5): 100 –

112.

ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100–112. (in Chinese)

[10] 张智泓, 甘帅汇, 左国标, 等. 以砂鱼鳃头部为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 3–10.

ZHANG Zhihong, GAN Shuaihui, ZUO Guobiao, et al. Bionic design and performance experiment of sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 3–10. (in Chinese)

[11] TANG Zhenyu, ZENG Zhiwei, WU Shuanglong, et al. Optimizing soil resistance and disturbance of bionic furrow opener for paddy field based on badger claw using the CFD–DEM method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109549.

[12] DENG Huan, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Simulation of full-film double-row furrow roller hole fertiliser application based on DEM–MBD coupling and research on its water and fertiliser transport law[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 190–206.

[13] LIU Lei, WANG Xianliang, ZHANG Xiangcai, et al. The impact of ‘T’-shaped furrow opener of no-tillage seeder on straw and soil based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108278.

[14] 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)

[15] XIE Fengze, PAN Guohua, ZHAO Weiwen, et al. Unresolved MPS–DEM coupling method for three-dimensional liquid-solid dam-break flows impacting on rigid structures[J]. Ocean Engineering, 2025, 323: 120601.

[16] 张静. 结球大白菜物理力学特性与履带自走式收获机械的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

ZHANG Jing. Research on physical and mechanical properties of headed Chinese cabbage and its crawler self-propelled harvesting equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)

[17] 张杰. 基于卷压理论的圆捆机成型仓钢辊布局优化设计研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.

ZHANG Jie. Study on roller layout optimization design of round baler forming chamber based on rotary compression theory[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[18] 张群. 循环三轴试验土样泊松比测试方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

ZHANG Qun. Study of method measuring poisson’s ratio of cyclic triaxial specimens[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)

[19] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 旋耕刀三向工作阻力试验及作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 51–58.

XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Experiment on three-axis working resistances of rotary blade and working parameters optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 51–58. (in Chinese)

[20] ZHANG Lei, ZHAI Yibin, CHEN Jianneng, et al. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105375.

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

[22] HUANG Bing, PAN Hong, WANG Xiaomeng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation for the interaction between heavy soil and soil-engaging components in shellfish culture[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2023, 104(1): 38–53.

[23] SIEMANN L A, DAVIS F H, BENDIKSEN T A, et al. Scallop dredge design using computational fluid dynamics and flume tank testing and the application of both methods to improving a low profile dredge[J]. Fisheries Research, 2021, 241: 105998.

[24] 林桂潮, 曾文勇, 徐垚, 等. 基于罚函数-高斯牛顿法的冗余采摘机器人逆解方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 355–362.

LIN Guichao, ZENG Wenyong, XU Yao, et al. Inverse kinematics solution for redundant picking robot based on penalty function and Gauss–Newton method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 355–362. (in Chinese)

[25] 王法安, 倪畅, 张兆国, 等. 基于穿山甲前足的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 10–19.

WANG Fa’an, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic digging shovel based on front foot of pangolin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 10–19. (in Chinese)