

基于狗獾前足趾结构特征的捡石机仿生减阻挖掘铲设计与试验

王 涛¹ 丁盛荣¹ 杨然兵^{1,2} 梁启敏¹ 吴敏生¹ 张 涛¹ 张 健¹

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570208; 2. 农业农村部热带高效农业智能装备重点实验室, 儋州 571700)

摘要: 针对传统捡石机挖掘铲在海南红壤田间作业中存在挖掘阻力大、能耗高的问题, 基于狗獾前爪趾结构, 设计了两种高效减阻的仿生挖掘铲, 并采用离散元仿真方法分析其减阻性能。以海南地区典型红壤及石块作为研究对象, 石块设为刚性体, 土壤颗粒之间采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型, 建立了石块-土壤离散元的复合体模型; 通过三维扫描技术获取狗獾前爪第3趾和石块的外部形态尺寸数据, 提取关键几何特征参数并运用 Solidworks 软件建立仿生挖掘铲和石块三维模型, 根据爪趾数字化模型设计了仿生挖掘铲1型和仿生挖掘铲2型两种挖掘铲; 以挖掘阻力为主要评价指标, 采用 EDEM 离散元法建立土壤-石块-挖掘铲相互作用模型, 分析仿生挖掘铲的减阻机理, 通过仿真结果计算得出仿生挖掘铲1型、仿生挖掘铲2型减阻率分别为 8.37% 和 15.43%。通过开展田间试验, 对比挖掘阻力和碎土效果, 仿生挖掘铲1型、仿生挖掘铲2型和平面挖掘铲平均挖掘阻力分别为 1 384.9、1 296.4、1 497.7 N, 仿生铲减阻率分别为 7.52% 和 13.42%, 与仿真结果接近, 其中仿生挖掘铲2型作业后土壤颗粒粒径更小, 说明仿狗獾挖掘铲2型铲具有良好的减阻特性和破土性能, 能满足红壤条件下石块挖掘作业。

关键词: 仿生; 捡石机; 挖掘铲; 减阻; 离散元

中图分类号: S222.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0179-15

OSID:



Design and Experiment of Biomimetic Drag-reducing Excavating Shovel for Stone-picking Machine Based on Foretoe Structure of Badger

Wang Tao¹ Ding Shengrong¹ Yang Ranbing^{1,2} Liang Qimin¹ Wu Minsheng¹ Zhang Tao¹ Zhang Jian¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570208, China

2. Key Laboratory of Tropical High-efficiency Agricultural Intelligent Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou 571700, China)

Abstract: Aiming to address the issues of high excavation resistance and excessive energy consumption encountered by traditional stone-picking excavator shovels during field operations in Hainan red soil, two biomimetic excavation shovels with enhanced resistance-reduction efficiency were designed based on the forepaw toe structure of the hog badger (*Arctonyx collaris*). The resistance-reduction performance of these shovels was analyzed by using the discrete element method (DEM). Typical red soil and stones from Hainan were selected as research materials, with the stones modeled as rigid bodies, and soil-particle interactions described by using the Hertz - Mindlin with JKR contact model to establish a composite stone - soil discrete element model. The external morphological and dimensional data of the third forepaw toe of the hog badger and the representative stones were obtained via three-dimensional scanning technology. Key geometric features were extracted, and three-dimensional models of the biomimetic excavation shovels and stones were constructed by using Solidworks software. Based on the digital model of the paw, two biomimetic excavation shovels, designated Type 1 and Type 2, were designed. Excavation resistance was chosen as the primary evaluation index, and a soil - stone - shovel interaction model was established by using EDEM software to analyze the resistance-reduction mechanism of the

收稿日期: 2026-04-26 修回日期: 2026-05-09

基金项目: 海南省国际科技合作研发项目 (GHYF2025010)

作者简介: 王涛(1980—), 男, 副教授, 主要从事热带农业装备及测试研究, E-mail: gxxyjs@163.com

通信作者: 杨然兵(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: yangranbing@hainanu.edu.cn

biomimetic shovels. The simulation results revealed that the resistance-reduction rates for Type 1 and Type 2 biomimetic excavation shovels were 8.37% and 15.43%, respectively. Field experiments were conducted to compare excavation resistance and soil-breaking performance. The average excavation resistances of Type 1 and Type 2 biomimetic excavation shovels and the conventional flat shovel were 1 384.9 N, 1 296.4 N and 1 497.7 N, respectively, corresponding to resistance-reduction rates of 7.52% and 13.42%, which closely aligned with the simulation results. Moreover, soil particles produced after operation with Type 2 biomimetic excavation shovels exhibited a smaller particle size distribution, indicating that the hog badger-inspired Type 2 shovel demonstrated superior resistance-reduction and soil-breaking performance, making it well-suited for stone excavation operations in red soil conditions.

Key words: biomimetic; stone-picking machine; digging shovel; drag reduction; discrete element

0 引言

中国热带地区农田土壤中普遍存在混杂石块的现象,导致农机作业触土部件出现严重的磨损和断裂,严重影响农田土壤耕作质量和农业生产效率。在海南省三亚、儋州等地,因地质条件原因,农田土壤以砖红壤和黄色砖红壤为主^[1]。土壤表面和土层中常含有大小不一的石块,在农业生产中,人工捡拾石块方式存在劳动强度大、效率低等问题。虽然部分地区已经使用捡石机进行石块清理作业,但是在挖掘时存在土壤堆积现象,会导致挖掘阻力大、能耗高的问题。其中挖掘铲作为挖掘作业的关键部件,挖掘阻力和破土性能是直接影响捡石机作业效率的主要因素。寻求能够减少挖掘铲阻力的方法和技术是提升机器挖掘作业效果的关键。

将仿生学与离散元方法相结合,是当前农机挖掘领域减阻降耗的研究热点^[2-3]。目前,国内外有大量学者对仿生挖掘铲进行了理论和试验研究。金俊等^[4]以蜈蚣头部凸起为仿生原型设计非光滑犁壁,田间试验表明:仿生非光滑水田犁壁与普通光滑水田犁壁相比,犁耕阻力降低 15.9%;李俊伟等^[5]针对黏重黑土地地区马铃薯挖掘铲挖掘阻力大、能耗高等问题,设计了一种基于仿生波纹结构的马铃薯减阻挖掘铲,降低了挖掘阻力;张金波等^[6]以黄鼠、小家鼠爪趾作为仿生对象,将其应用到深松铲上,在减阻、减粘脱附等方面具有良好的效果;曹成茂等^[7]设计了一种仿鲨鱼背鳍结构的仿生挖掘铲,达到减阻降耗的目标;益爱丽等^[8]根据仿狗前爪的特点,设计了仿生木薯挖掘铲,有效提高了木薯收获效率;肖茂华等^[9]提取了蜈蚣爪趾的边缘曲线特征,设计了一种仿生旋耕刀,有效降低了旋耕刀耕作时的能耗;王亨泰等^[10]以蜈蚣前足趾构型为研究对象,设计了仿生挖掘铲,进行了离散元仿真并通过环形土槽试验对其性能进行测试,验证了良好的减阻挖掘效果;马俊等^[11]为减小起石铲入土阻力,基于疣猪鼻部的非光滑结构,对 1JS-200 型农田捡石机

起石铲进行仿生设计,降低了挖石过程的阻力;Song 等^[12]结合鼯鼠爪结构与标准深松机设计,提出了一种仿生深松机,该设计有效减小了牵引力,并增大了犁体扰动宽度;Zhang 等^[13]以蟋蟀前趾为仿生模型,运用结构仿生学与逆向工程方法,设计了一种专为某区域茶园应用的四杆深松机具,实现了高效的低阻深松效果。

综上,仿生结构在农机触土部件减阻与减粘附方面已取得较好应用效果,但现有研究主要集中于根茎类作物收获、松土和开沟等作业部件,针对复杂土石混合环境下捡石机挖掘铲的仿生减阻研究仍较少。为降低红壤区捡石机挖掘阻力,本文以海南省典型红壤农田为研究对象,测定土壤与石块物理参数,基于仿生学原理设计两种仿狗獾爪趾结构挖掘铲;采用离散元法建立土壤-石块-挖掘铲相互作用模型,分析不同挖掘铲作业过程中的受力特性,揭示仿生挖掘铲的减阻特性,并通过田间对比试验验证仿生挖掘铲的作业性能,以期为捡石机挖掘铲结构优化及减阻设计提供参考。

1 红壤土及石块物理参数测定

海南农田土壤以红壤为主,其质地偏黏重且含有一定数量的不规则石块。经过实地调研发现,典型的红壤农田石块主要分布在表层至深度为 120 mm 范围内,平均直径在 35 ~ 60 mm 之间,且分布位置不均匀。对农田不同位置的石块进行多次取样,如图 1 所示,统计不同尺寸石块的占比情况,如表 1 所示。石块埋深直接影响捡石机挖掘铲的入土深度,挖掘深度的增加会导致挖掘阻力的增大,这是捡石机在红壤条件下产生阻力的主要来源。

1.1 石块物理参数测定

以海南典型红壤农田石块为研究对象,在红壤农田中采用等距取样法,每隔 1 m 设置 1 个 1 m × 1 m 的样方,采集了不同土层(0 ~ 100 mm 和 100 ~ 200 mm)的石块样本。在每个样方内,用筛网将石块分为小型石块(直径约为 35 mm)、中型石块(直



图 1 红壤农田石块埋深测量场景

Fig. 1 Measurement scenario of burial depth of stones in red soil farmlands

表 1 石块分布统计结果

Tab. 1 Statistical distribution of stones

深度/mm	直径/mm	占比/%
0 ~ 30(表层)	≤40	65.07
	40 ~ 55	25.39
	≥55	9.54
30 ~ 100(深度层)	≤40	55.88
	40 ~ 55	26.47
	≥55	17.65

径约为 45 mm)、大型石块(直径约为 55 mm)3 种类型。小型石块主要以红岩石块为主,中型石块、大型石块分别以石灰岩石块和花岗岩石块为主。如图 2 所示,选取这 3 种样品代表农田中的典型石块。将 3 种石块样本洗净、擦拭后,为避免石块放入水中产生气泡,先用酒精对石块进行擦拭处理,再使用直读式固体密度计(上海祈工仪器设备有限公司,MH-300 型)进行固体密度测量,可测出 3 种石块的密度,3 种石块各进行 5 组重复试验,得出红岩石块(小型)的平均密度为 2.41 g/cm³,石灰岩石块(中型)的平均密度为 2.56 g/cm³,花岗岩石块(大型)的平均密度为 2.61 g/cm³。



图 2 3 种类型石块

Fig. 2 Three types of stones

1.2 红壤物理参数测定

为了构建与实际相符的土壤离散元模型,通常需要考虑土壤含水率、土壤颗粒粒径、分级以及土壤物理形态。为确保测定结果的准确性和减少采样误差,采样前先将土壤表面的杂草去除,每隔 1 m 设置一个 1 m² 采样区域,每个区域采用五点采样法取样

0 ~ 100 mm 和 100 ~ 200 mm 深度的土壤,两种深度土层样本质量都为 (740 ± 10) g。为防止在筛选过程中可能发生的土壤颗粒间的重新粘结现象,利用标准试验筛对烘干后的土壤进行筛分,筛分时间为 15 min。测量各粒径区间土壤的总质量,并计算不同土层中各粒径土壤的比例。两种深度的土层各进行 10 组重复试验,结果取平均值。测得 0 ~ 100 mm 深度层粒径小于 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、大于 4 mm 的土壤颗粒占比分别为 26.61%、18.12%、24.93% 和 30.34%;100 ~ 200 mm 深度层的粒径占比分别为 34.22%、22.64%、23.78% 和 19.36%。土壤颗粒筛分如图 3 所示。

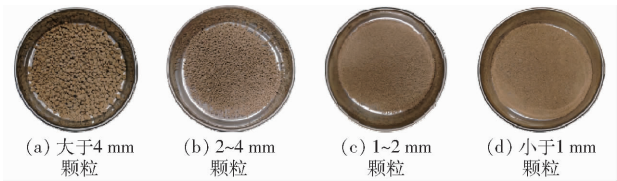


图 3 土壤颗粒筛分

Fig. 3 Sieving of soil particles

参照 TS ISO 11465—1997 《土壤质量 采用重量法对土壤质量干物质和水含量的测定》,结合石块在农田土壤分布情况,分别测定深度为 0 ~ 100 mm 和 100 ~ 200 mm 的同一田块的土壤。将采集的土壤样本于烘干箱烘干至恒质量,并精确记录其烘干前后的质量变化,如图 4 所示。



图 4 土壤含水率测定

Fig. 4 Determination of soil moisture content

样本土壤含水率计算式为

$$w_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中 w_s ——土壤含水率,%
 m_1 ——土壤初始质量,g
 m_2 ——烘干至恒质量后土壤质量,g

经过多组重复试验,计算得深度为 0 ~ 100 mm 土壤平均含水率为 9.18%,深度为 100 ~ 200 mm 土壤平均含水率为 22.27%。

2 捡石机仿生挖掘铲设计

通过对狗獾前爪趾结构的研究,发现其前爪趾尖端呈明显锥形,具备良好的破土穿透性能。在长

期的挖掘行为中,尖部因频繁接触土壤和石块而经历持续磨损,这一过程促使其结构在自然进化中形成了更高的硬度与韧性。狗獾挖洞而居,凭借强健的前肢和锋利的爪子,挖出的洞穴在地面面积可达 20 m²,深的洞穴距地面可达 10 m^[14]。通过对狗獾前爪趾进行研究,发现其共有 5 趾,如图 5 所示,中间第 3 趾最长,该趾横截面呈类三角形或弯月状,结构强度高,具备优良的抗形变能力与耐磨性能,是狗獾在掘土过程中承担主要破土任务的关键结构单元。因此,选取前爪第 3 趾,研究其特征结构与曲面轮廓。如图 6 所示,该趾外侧为平滑过渡的弧形轮廓,呈现自然弯曲的流线型形态,内侧则构成略微内凹的曲面结构,边缘微微上翘。该趾前端轮廓呈弧形楔状,具有良好的入土导向性能,可在初始破土阶段有效分散施加于土体表面的单位压力,减小触土面积。



图 5 狗獾前爪趾
Fig. 5 Forepaw toes of badger
1. 第 1 趾 2. 第 2 趾 3. 第 3 趾 4. 第 4 趾 5. 第 5 趾



图 6 狗獾第 3 趾特征结构
Fig. 6 Characteristic structure of the third toe of badger

如图 5、6 所示,狗獾前爪第 3 趾的俯视轮廓由上缘曲线与下缘曲线共同构成,其整体形态呈细长的流线型结构。上缘弧度平滑、过渡自然,由趾尖向趾根逐渐展宽;下缘略向内收,形成轻微凹陷,使得趾体横向厚度沿长度方向呈连续变化。该几何特征使爪趾在掘土过程中具备良好的入土导向性与土壤流动分离能力。俯视轮廓上缘曲线与下缘曲线的组合构成前缘尖钝适中的楔形轮廓,既能在入土初期有效减小接触面积,降低瞬时穿透阻力,又能通过平顺的曲率变化引导土体沿两侧滑移分流,从而减小土体粘附与摩擦,提高挖掘效率与结构耐磨性。

2.1 狗獾爪趾三维建模

采用高精度蓝光三维扫描仪(杭州先临天远三维公司,OKIO-5 M 型)采集狗獾前爪第 3 趾点云数据建立模型。通过三维扫描技术及软件对实际结

构进行逆向建模和数据处理^[15]。对狗獾前爪进行环绕扫描,如图 7a 所示,再利用后处理软件进行除噪点、修剪和光滑等处理,如图 7b 所示,得到狗獾前爪第 3 趾的三维模型如图 7c 所示。

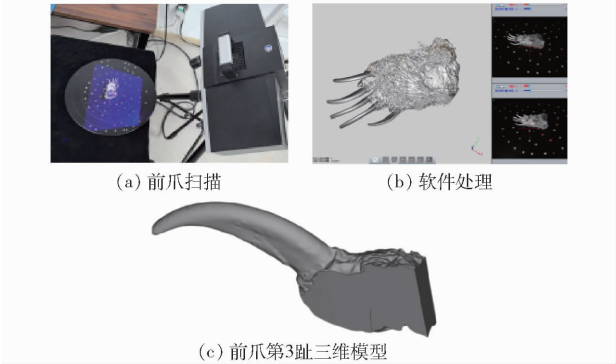


图 7 爪趾扫描建模过程

Fig. 7 Scanning and modeling process of toe

根据扫描获得的狗獾前爪三维模型,提取狗獾前爪第 3 趾侧视和俯视的内外轮廓曲线,并利用 GetDataGraph Digitizer 软件提取前爪侧视图的内外轮廓 y_1 和 y_2 散点数据,如图 8a 所示;提取俯视图的内外轮廓曲线 y_3 和 y_4 散点数据,如图 8b 所示。并将数据导入到 Excel 中,利用 Origin 软件进行五次多项式曲线拟合,得到侧视图的内外轮廓 y_1 和 y_2 拟合曲线,分别如图 9a、9b 所示,俯视图的内外轮廓曲线 y_3 和 y_4 拟合曲线分别如图 9c、9d 所示。

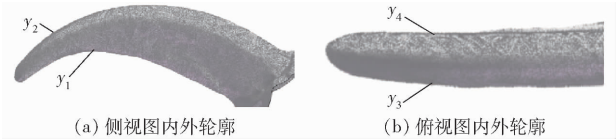


图 8 第 3 趾侧视图和俯视图内外轮廓

Fig. 8 Inner and outer contours of the third toe in side and top views

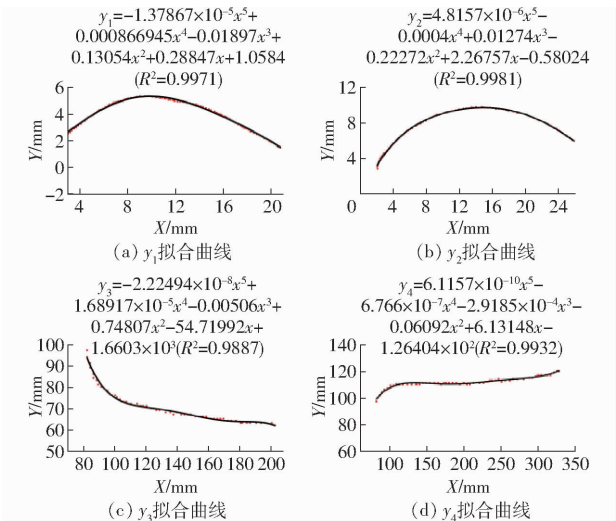


图 9 第 3 趾侧视图和俯视图拟合曲线

Fig. 9 Fitted curves of the third toe in side and top views

由图 9 可知,通过 Origin 软件得到前爪第 3 趾

侧视和俯视内外轮廓曲线拟合方程分别为

$$y_1 = -1.378\ 67 \times 10^{-5} x^5 + 0.000\ 866\ 945 x^4 - 0.018\ 97 x^3 + 0.130\ 54 x^2 + 0.288\ 47 x + 1.058\ 4 \quad (2)$$

$$y_2 = 4.815\ 7 \times 10^{-6} x^5 - 0.000\ 4 x^4 + 0.012\ 74 x^3 - 0.222\ 72 x^2 + 2.267\ 567 x - 0.580\ 24 \quad (3)$$

$$y_3 = -2.224\ 94 \times 10^{-8} x^5 + 1.689\ 17 \times 10^{-5} x^4 - 0.005\ 06 x^3 + 0.748\ 07 x^2 - 54.719\ 92 x + 1.660\ 3 \times 10^3 \quad (4)$$

$$y_4 = 6.115\ 7 \times 10^{-10} x^5 - 6.766 \times 10^{-7} x^4 - 2.918\ 5 \times 10^{-4} x^3 - 0.060\ 92 x^2 + 6.131\ 48 x - 1.264\ 04 \times 10^2 \quad (5)$$

4 条轮廓拟合曲线方程的 R^2 (决定系数) 均大于 0.98, 保证了提取的内外轮廓曲线与实际生物特征曲线的拟合精度, 满足拟合要求。

2.2 仿生挖掘铲的结构设计

挖掘铲作为捡石机的关键工作部件, 主要功能是实现土壤中石块的高效挖掘, 同时尽可能地将大块土壤破碎, 提高后续筛分与排土过程的作业效率。参考农业机械中的土壤耕作机具材料与结构规范^[16], 对现有市售石块清除机设备的规格调研 (其工作幅宽多在 1 000 ~ 1 600 mm), 结合本研究高湿红壤土的物理条件、石块尺寸分布、拖拉机功率及机具通用性要求, 在满足作业效率的前提下降低设备负载, 设定挖掘铲的工作幅宽为 1 100 mm, 选用不锈钢材料制造, 考虑到铲片之间的间隙对漏土的影响, 设定铲片间距为 50 mm, 铲片的结构尺寸设定为 210 mm × 90 mm × 10 mm (长 × 宽 × 厚)。三角铲具有较强的破土能力和一定的扰土效果, 因此在普通三角平面铲的基础上, 如图 10a 所示, 利用提取的狗獾第 3 趾曲线拟合方程构建三维模型, 选择提取的拟合曲线 y_1 、 y_2 作为仿生挖掘铲侧面内外轮廓曲线, 利用 Solidworks 中的方程驱动曲线命令, 根据方程绘制曲线, 并通过比例缩放、平移、旋转、裁剪等命令建立了仿生挖掘铲 1 型单铲的三维模型, 如图 10b 所示。根据狗獾爪趾俯视轮廓上缘曲线与下缘曲线的组合构成前缘尖钝适中的楔形轮廓, 平顺的曲率变化可引导土体沿两侧滑移分流, 从而可能进一步



图 10 3 种挖掘单铲三维模型

Fig. 10 3D model of three types of single digging shovels

降低挖掘阻力, 减小应力集中, 并改善应力分布状态^[17], 尽管俯视轮廓对土壤分流和导向具有积极作用, 但在田间作业中, 土壤的有效切削力和破碎力主要依赖侧视轮廓形状提供, 单独采用俯视轮廓的铲具难以在保持入土稳定性的同时产生足够切削作用, 因此其破碎效果和减阻性能受限。基于此, 在仿生挖掘铲 1 型的基础上将 y_3 、 y_4 曲线用于挖掘铲俯视内外轮廓综合设计, 得到仿生挖掘铲 2 型单铲的三维模型, 如图 10c 所示。

3 挖掘铲力学分析

在捡石机挖石作业过程中, 挖掘阻力主要受前进速度、铲面上积累土壤正压力、土壤在铲面上的摩擦阻力的影响。同时, 在作业过程中, 挖掘铲主要受到铲尖和铲柄部分作用力^[18-19], 为简化受力分析, 对石土混合物和挖掘铲铲尖受力进行理论分析。

3.1 铲尖受力分析

挖掘铲工作时, 为了避免巨大的集中应力和冲击载荷, 挖掘铲挖掘深度应大于石块在土中的埋藏深度, 仿生挖掘铲铲尖部分可近似视为在土壤中水平低速运动的斜面^[20]。挖掘铲受力分析如图 11 所示。

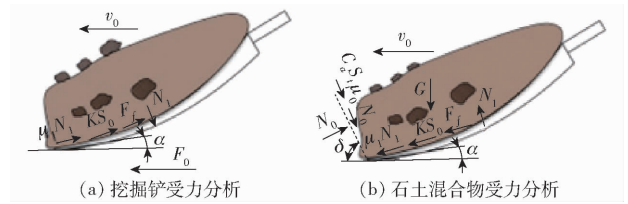


图 11 挖掘铲力学分析

Fig. 11 Mechanical analysis of excavator shovel forces

根据图 11a 中受力情况, 分析得到在挖掘过程中牵引力 F_0 满足

$$F_0 = N_1 \sin \alpha + (K S_0 + \mu_1 N_1 + F_f) \cos \alpha \quad (6)$$

式中 α ——挖掘铲入土倾角, ($^\circ$)

K ——土壤附着力, N/mm^2

μ_1 ——挖掘铲与土壤之间的摩擦因数

N_1 ——铲尖上方土壤对铲尖的法向压力, N

S_0 ——挖掘铲工作接触面积, mm^2

F_f ——纯切削力, N

在石块挖掘过程中, 对作用在挖掘铲上的石块-土壤混合物进行理论分析, 如图 11b 所示。水平和垂直方向受力分析为

$$N_1 \sin \alpha + (\mu_1 N_1 + K S_0 + F_f) \cos \alpha - N_0 \sin \delta - (C_a S_t + \mu_0 N_0) \cos \delta = 0 \quad (7)$$

$$G - N_1 \cos \alpha + (\mu_1 N_1 + K S_0 + F_f) \sin \alpha - N_0 \cos \delta + (C_a S_t + \mu_0 N_0) \sin \delta = 0 \quad (8)$$

联立公式(6)~(8)得

$$F_0 = \frac{G}{P} + \frac{KS_0 + F_f}{P(\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha)} + \frac{C_a S_t}{P(\sin\delta + \mu_0\cos\delta)} \tag{9}$$

其中
$$P = \frac{\cos\alpha - \mu_1\sin\alpha}{\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha} + \frac{\cos\delta - \mu_0\sin\delta}{\sin\delta + \mu_0\cos\delta} \tag{10}$$

式中 C_a ——土壤内聚力, N/mm²

δ ——土壤前失效面倾角, (°)

N_0 ——铲尖上方土壤受到前失效面压力, N

μ_0 ——土壤内摩擦因数

G ——石土混合物重力, N

S_t ——铲尖剪切土壤面积, mm²

通过对挖掘铲作用于石块-土壤混合物的受力特性分析可知,牵引力 F_0 受到土壤物理性质、挖掘铲几何参数及作业参数的综合影响。进一步对牵引力 F_0 进行多变量偏导分析,可获得挖掘铲入土倾角 α 与土壤前失效面倾角 δ 的最优值,从而为优化作业参数提供理论依据,其表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial F_0}{\partial \alpha} = -\frac{KS_0 + F_f}{P(\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha)^2}(\cos\alpha - \mu_1\sin\alpha) \\ \quad \left(0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{\partial F_0}{\partial \delta} = -\frac{C_a S_t}{P(\sin\delta + \mu_0\cos\delta)^2}(\cos\delta - \mu_0\sin\delta) \\ \quad \left(0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \tag{11}$$

为求牵引力 F_0 最小值,令牵引力 F_0 的两个偏导数趋近于零,可知当 α 和 δ 向45°收敛时,牵引力 F_0 越小,即挖掘阻力也越小。参考不同铲面倾角对挖掘阻力的影响规律曲线,并结合类似曲面结构仿生铲的铲面倾角设计范围^[20],设定入土倾角 α 为25°,前失效面倾角 δ 为30°。

3.2 挖掘过程动力分析

对仿生挖掘铲挖掘土石混合物过程进行动力分析,将仿生挖掘铲曲面分为3个典型位置,前段S1(滑移区)、中段S2(平缓区)、后段S3(提升区),在仿生挖掘铲3个典型位置中各取一点 O 进行分析,运动分析如图12所示。

为简化挖石过程中复杂的动态响应,引入速度响应系数 $\lambda(s)$ 代表真实土壤中复杂的动态摩擦、剪切和流动效应对相对运动的影响^[21-23]。图12中速度关系为

$$V_t(s) = v_0 \cos\theta(s) \tag{12}$$

$$\frac{dV_t}{ds} = -v_0 \sin\theta(s) \frac{d\theta}{ds} \tag{13}$$

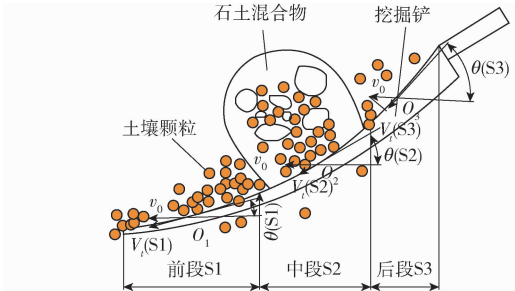


图 12 挖掘铲运动过程分析

Fig. 12 Analysis of excavator shovel movement process

$$V_m(s) = \lambda(s) V_t(s) \tag{14}$$

式中 $V_t(s)$ ——挖掘铲沿铲面的局部切向速度, m/s

$\theta(s)$ ——曲面在该点的切线方向与水平面夹角, (°)

s ——沿挖掘铲工作曲面方向的弧长坐标, mm

$V_m(s)$ ——土石混合物相对曲面的滑动速度, m/s

$\lambda(s)$ ——速度响应系数,反映物料的滑移、滚动等影响,取(0,1)

v_0 ——挖掘铲前进速度, m/s

根据式(12)~(14)可知,仿生挖掘铲前段的局部切向速度 $V_t(S1)$ 较大,导致土石混合物引入铲面时速度较快,易产生较大的滑移现象。进入仿生挖掘铲中段后,由于 $\theta(s)$ 增大,局部切向速度 $V_t(S2)$ 逐渐减小并趋于平缓,速度调控更加稳定,有助于土石混合物的顺畅输送并避免石块与挖掘铲剧烈碰撞。在仿生挖掘铲后段,局部切向速度 $V_t(S3)$ 更小,土石混合物的运动速度方向主要为法向向上,主要起到快速提升和稳定混合物流动的作用。与平面挖掘铲相比,仿生挖掘铲在处理土石混合物时表现出更合理的速度调控特性,而平面挖掘铲因其铲面倾角固定,土石混合物在铲面上的切向驱动速度基本保持不变,容易导致混合物在进入铲面初期产生较大的瞬时滑移,与铲面产生较大冲击,在输送过程中易出现土壤堆积与不稳定流动。仿生挖掘铲则由于铲面局部倾角沿弧长方向连续变化,使土石混合物在铲面上的局部切向速度呈渐变分布特征,实现了由快速引入、平稳输送到快速抬升的连续过渡过程。这种速度分布能够有效降低混合物运动过程中的速度突变与滞留风险,增强土石混合物在铲面上的整体流动稳定性,从而提高挖掘与输送过程的连续性和降低挖掘阻力。

通过对仿生挖掘铲与土石混合物的力学分析可知,其挖掘阻力不但受土壤自身的物理特性参数影响,还受到挖掘铲几何结构参数影响,如挖掘铲的铲面倾角、挖掘铲与土壤的接触面积等影响。

4 离散元仿真试验

土壤具有离散颗粒结构特性。针对捡石机挖掘铲作业过程,基于 EDEM 软件构建土壤-石块-挖掘铲的离散元复合体仿真模型。基于该模型模拟不同铲型在典型红壤土作业过程中的状态,从土壤颗粒流速方面深入分析仿生挖掘铲减阻的机理,并以挖掘阻力为主要评价指标,对比分析仿生挖掘铲的减阻性能。

4.1 离散元模型建立

4.1.1 石块离散元模型建立

为准确模拟捡石机作业过程中铲体与土壤中石块的相互作用,需建立符合实际特征的石块离散元模型。农田中常见的石块多呈不规则近椭球状,表面粗糙且边缘圆钝。为了提高模型的准确性,采用三维扫描仪获取 3 种典型石块样本的形态特征,提取其外轮廓与主要尺寸特征。对其进行去除噪点、修整不规则凹凸特征等处理后构建了 3 种典型石块实体模型,并导入 EDEM 软件进行颗粒填充。考虑到石块质地坚硬、刚性高,选用 Hertz - Mindlin 接触模型进行颗粒填充。

为了平衡仿真周期与计算效率,针对石头模型的离散元建模,采用了半径为 2 mm 的颗粒来填充石块的内部结构,如图 13 所示。通过精细化的颗粒填充,能够有效模拟石块在受力过程中的响应特性,确保了模型的物理特性与实际农田环境的准确性。

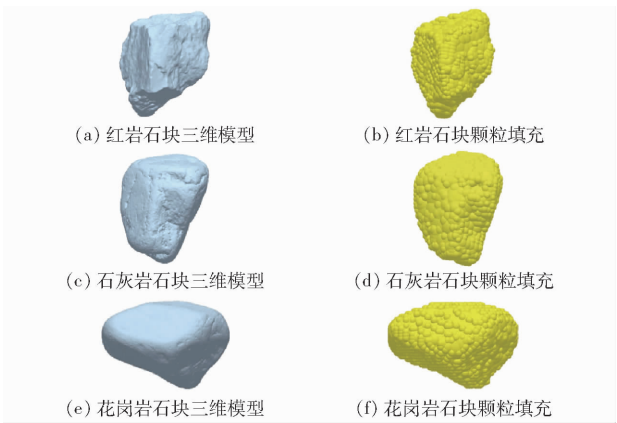


图 13 3 种石块离散元模型

Fig. 13 Discrete element models of three types of stones

4.1.2 土壤颗粒离散元模型

由于计算资源的限制,在数值模拟中直接使用实际尺寸的微小颗粒和相同形状的颗粒模型是不切实际的,因此大多数模拟研究采用了较大尺寸和多种球形的颗粒作为替代,这一方法已被广泛采用^[24-26]。为确保合理的计算时间,可利用 EDEM 软件中设置不同颗粒的空间坐标,组合成多种形式的颗粒形状,用来表达不同粒径的土壤颗粒^[20],考

虑到田间土壤颗粒形状复杂且尺寸分布广,为减少计算量,本研究采用 3 mm 单球、双球、三球和四球组合模型来近似土壤颗粒。该方法可在保持颗粒总体积、密度和摩擦特性的前提下,合理代表土壤颗粒的接触行为。如图 14 所示,本研究使用单球到四球模型分别模拟小于 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、大于 4 mm 土壤颗粒,在减少计算量的基础上尽量接近真实颗粒的体积和接触特性。

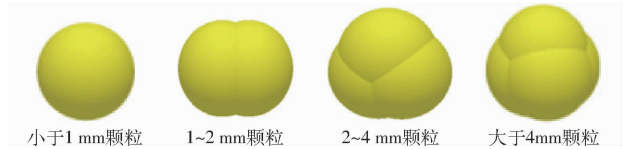


图 14 土壤颗粒离散元模型

Fig. 14 Discrete element models of soil particles

海南典型种植农田土壤为带有黏性的红壤土,颗粒间具有一定的粘附现象与可压缩性,在机械扰动下易形成粘结团聚现象。为准确描述颗粒间的真实接触行为,本文在 EDEM 中采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型对土壤颗粒进行模拟。该模型基于 Hertz - Mindlin 接触理论,计算法向阻力和切向力的方法与 Hertz - Mindlin 接触模型相同,与常规非粘附模型相比,该模型能更真实反映土壤在挖掘、碰撞与压实过程中颗粒间的力学响应。该模型接触力计算式为

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E_y} R^{\frac{3}{2}} + \frac{4E_y}{3R_q} R^3 \quad (15)$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \quad (16)$$

式中 F_{JKR} ——JKR 接触模型法向接触力, N

R ——颗粒间接触半径, mm

E_y ——等效杨氏模量, MPa

R_q ——颗粒等效接触半径, mm

γ ——土壤颗粒表面能, J/mm²

E_a 、 E_b ——接触球杨氏模量, MPa

μ_a 、 μ_b ——接触球泊松比

在加载和卸载阶段,法向力都遵从方程(15),当 $\gamma = 0$ 时, Hertz - Mindlin 法向力为

$$F_H = \frac{4}{3} E_y \sqrt{R_q} w^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

$$w = \frac{R^2}{R_q} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma R}{E_y}} \quad (18)$$

式中 F_H ——Hertz - Mindlin 接触法向力, N

w ——重叠量, mm

JKR 模型可在颗粒尚未发生物理接触时施加内聚力作用,其作用力可跨越的最大颗粒间间隙 C_l 的计算公式为

$$C_l = -\sqrt{\frac{4\pi\gamma R_c}{E_y}} + \frac{R_c^2}{R_q} \tag{19}$$

其中
$$R_c = \left[\frac{9\pi\gamma R_q^2}{2E_y} \left(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{20}$$

$$\frac{1}{R_q} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \tag{21}$$

式中 C_l ——具有非零力粒子间最大间隙,mm
 R_c ——临界接触半径,mm
 $R_a、R_b$ ——相邻土壤颗粒接触半径,mm

当颗粒间分离距离超过 C_l 时,颗粒间无粘附作用,模型返回的接触力为零;当颗粒间距离小于 C_l 时,采用 JKR 模型计算颗粒间粘附力,其计算公式为

$$F_j = \begin{cases} -\frac{3}{2}\pi\gamma R_q & (-C_l < w < 0) \\ 2\pi\gamma\cos\varphi\sqrt{R_aR_b} & (w \geq 0) \end{cases} \tag{22}$$

式中 F_j ——土壤颗粒间粘附力,N
 φ ——土壤颗粒润湿角,(°)

在计算土壤颗粒间摩擦时,主要受由 JKR 法向力产生的正排斥力影响,当接触力中的内聚力分量较大时,JKR 粘附接触模型能够提供较高的摩擦力。在模拟湿颗粒行为时,JKR 模型中颗粒所需的分离力由颗粒间的润湿角和液体的表面张力共同决定。

4.1.3 石块-土壤离散元复合体模型

选取恰当的接触力学模型对土石复合物中粘结效应的分析具有关键意义,其准确性直接影响挖掘铲与颗粒之间相互作用的表征结果与力学响应模拟的可靠性^[27]。为构建能够真实反映耕作介质中石块与土壤相互作用机制的数值模型,本文针对土壤颗粒间存在一定程度内聚力及粘附特性的问题,选取 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型对其相互作用进行模拟。这是因为与 Hertz - Mindlin 接触理论相比,JKR 理论补充了粘附力对颗粒接触的影响,从而使模型能够更全面地描述在弹性和粘附力共同作用下的颗粒接触特性。同时,为减少计算复杂度并保持刚性体碰撞特性的合理表达,石块与挖掘铲之间、石块与石块之间的接触行为则采用标准 Hertz - Mindlin 接触模型建模。土壤与石块接触虽然存在一定微观粘性,但相对于土壤自身的内聚力和摩擦力,这种粘性作用较小,对宏观受力和挖掘阻力影响有限。在仿真中,主要关注法向弹性恢复力和摩擦滑动行为,同时由于石块刚性较大、土壤黏性有限,采用 Hertz - Mindlin with JKR 模型在本系统中不完全适用,且会显著增加计算复杂度,因此采用标准 Hertz - Mindlin 接触模型即可,未引入粘结参数。该处理方式既符合实际物理规律,又在保证模型精度

的前提下简化了仿真计算过程。

上述复合接触模型在保证模拟精度的前提下,提高了计算效率。仿真参数设定与土壤粘聚特性具有高度相关性,通常通过堆积角试验对土壤离散元模型参数进行校准^[28],参考文献[29 - 33]已有研究数据和通过实际物理试验得出表 2 所示关键仿真参数范围,所采用参数值与文献中类似材料的典型范围一致,确保了仿真结果的合理性与可比性。按照文献[29]所述方法对仿真参数进行标定,最后对采用的参数进行堆积角仿真试验,仿真和实际测量试验各重复进行 10 次,仿真试验堆积角结果和物理试验实测堆积角结果如图 15 所示。由图 15 可知,仿真堆积角平均值为 37.23°,与物理试验实测平均值 38.31°相对误差为 2.82%,误差在合理范围内,表明模型能够准确反映土壤堆积特性。

表 2 离散元仿真模型基本参数
Tab.2 Basic parameters of discrete element simulation model

参数	数值
上层土壤颗粒密度/(kg·m ⁻³)	1 490
下层土壤颗粒密度/(kg·m ⁻³)	1 610
不锈钢密度/(kg·m ⁻³)	7 861
土壤颗粒泊松比	0.36
土壤颗粒剪切模量/Pa	1 × 10 ⁶
不锈钢剪切模量/Pa	7.94 × 10 ¹⁰
土壤-土壤静摩擦因数	0.52
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.12
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.25
土壤-土壤表面能/(J·m ⁻²)	5.14
石块-土壤静摩擦因数	0.50
石块-土壤滚动摩擦因数	0.15
石块-土壤碰撞恢复系数	0.06
土壤-挖掘铲静摩擦因数	0.60
土壤-挖掘铲动摩擦因数	0.06
土壤-挖掘铲碰撞恢复系数	0.10

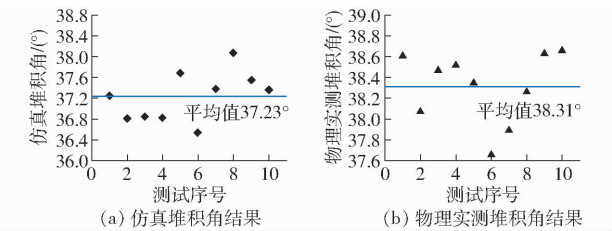


图 15 仿真与物理实测堆积角结果
Fig.15 Results of angle of repose obtained from simulation and physical measurement

为了模拟实际的挖石作业过程和提高仿真效率,建立尺寸(长×宽×高)为 2 100 mm × 1 200 mm × 400 mm 的虚拟土槽,设置颗粒以 Dynamic 方式生成,经过重力作用下的沉降,以保证土壤被压实,使

仿真土壤与实际土壤保持一致。根据统计得出的不同深度石块占比状况,浅层位置随机设置红岩石块 41 个,石灰岩石块 16 个,花岗岩石块 6 个;在 100 ~ 120 mm 深度层中 3 种石块分别随机设置 19、9、6 个。仿真模型共生成上、下两层土壤,上层土壤高度为 100 mm,下层土壤高度为 130 mm,共生成 885 000 个土壤颗粒,土壤单球到四球颗粒数目按照筛分结果的颗粒占比分别为 274 620、183 860、212 910、213 610 个,生成的土壤-石块复合离散元模型如图 16 所示。

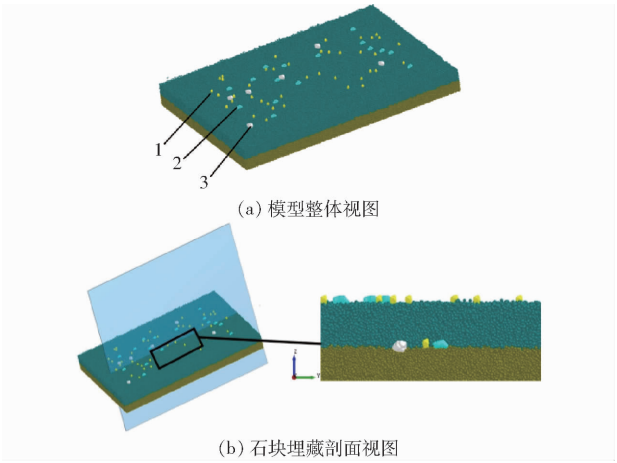


图 16 土壤-石块复合离散元模型

Fig. 16 Soil-rock composite discrete element model

1. 红岩石块 2. 石灰岩石块 3. 花岗岩石块

4.2 仿真试验与结果分析

创建好土壤-石块复合体离散元模型后,将 STL 格式的挖掘铲导入 EDEM。尽管田间石块埋藏深度约为 120 mm,但为全面模拟铲具切入土体、扰动土壤及完整作用于石块挖掘的全过程,同时避免铲具与石块瞬间碰撞导致的应力突变,仿真挖掘深度略大于石块实际埋藏深度,故设定挖掘深度为 180 mm;综合考虑入土角对仿生铲土壤扰动行为、石块-土壤混合体受力状态及挖掘阻力的影响,设定仿生挖掘铲的入土角为 25° ^[34]。牵引速度设置为 0.4 m/s,以近似田间作业条件下铲具的典型推进速度,该速度既能保证土块切削过程连续性,又能确保离散元仿真计算的数值稳定性,同时便于评价铲具在实际作业条件下的减阻性能,并通过添加 Linear-

Translation 运动实现仿生铲的匀速前进^[35]。为保证仿真过程中颗粒-结构间相互作用计算的稳定性与连续性,固定时间步长设置为 15% Rayleigh 时间步长。0 ~ 2.2 s 为挖掘铲由 0 m/s 到 0.4 m/s 的加速时间,仿真总时长设定为 8.4 s。

4.2.1 土壤颗粒速度与流动分析

在挖掘铲处于稳定作业阶段时,土壤颗粒的扰动速度场可以通过矢量形式表示。3 种挖掘铲扰动土壤颗粒速度矢量如图 17 所示,图中矢量箭头的方向和长度分别表示土壤颗粒的运动方向和速度大小,而箭头的颜色则体现了速度变化的趋势(由红到蓝速度依次减小)。在 EDEM 仿真环境中,对比分析仿生挖掘铲与平面挖掘铲在捡石机作业过程中的颗粒速度分布特性,结果表明,铲具进入土壤初期,土壤颗粒受铲尖扰动开始发生位移,逐渐形成稳定流动。如图 17a 所示,平面挖掘铲在挖掘过程中,其后段土壤颗粒速度显著高于铲尖部位,颗粒流动主要沿铲面滑移,平面挖掘铲表面土壤颗粒流动速度较慢,土壤容易在铲面滞留,阻碍挖掘铲前进并增大挖掘铲上的垂直压力;由图 17b、17c 可知,仿生挖掘铲在铲尖区域表现出较高的颗粒流动速度,说明其前端具备较强的破土能力。进一步分析颗粒速度矢量发现,两种仿生挖掘铲中后段土壤颗粒向铲体内侧弧面收敛,运动方向趋向铲体曲面圆心,具有良好的引导与抬升作用,降低垂直方向受力,有助于石块的暴露与分离。同时,仿生挖掘铲 2 型前端尖钝适中的楔形结构,与土壤颗粒的接触面积较小,使土壤颗粒沿仿生轮廓面发生分流,流动性增强,有效减少了土壤堆积。图 17 颗粒颜色表明,在 3 种铲型中,仿生挖掘铲 1 型和仿生挖掘铲 2 型周围土壤颗粒的运动速度更快,其中仿生挖掘铲 2 型的滑移速度最快,这使得同一时间内仿生挖掘铲 2 型铲面上附着的土石混合物更少,从而有效降低了挖掘阻力。综合来看,仿真过程中石块不与挖掘铲铲面发生接触和碰撞,这是因为直接接触石块时,铲面与硬质石块的碰撞会导致局部应力集中,使挖掘时阻力增大,增加设备损耗并影响挖掘效率。在设置合理的挖掘深度基础上,仿生挖掘铲 2 型在颗粒速度分布和运

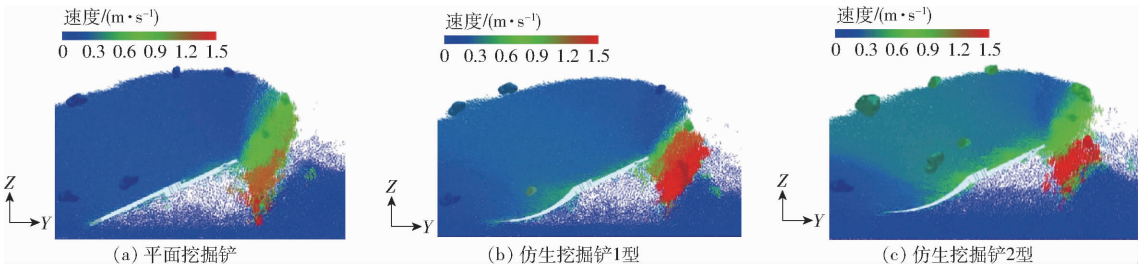


图 17 土壤颗粒速度场

Fig. 17 Velocity distribution field of soil particles

动方向引导方面具有显著优势,可减少输送到土石分离装置的土壤颗粒数量,从而可在一定程度上提高捡石作业中的土石分离效果。

4.2.2 石块运动规律对比分析

石块在机械挖掘装置作用下的运动行为及方式是决定能量消耗和挖掘效率的关键因素,也是优化挖掘路径、降低作业阻力的重要理论基础,因此石块的存在对挖掘过程有重要的影响。通过截取离散元

模拟仿真中石块在不同时刻的运动状态,可揭示石块在经历平衡阶段、输送阶段及沉降阶段中的动力学特征,如图 18 所示。在挖掘铲还未全部进入土壤时,石块在土石混合介质中还处于平衡状态,随后在挖掘铲的作用下,石块在土石混合介质中出现失稳现象,石块开始沿着挖掘铲铲面向后运动,当石块运动到铲面尾部时,石块失去支撑作用,在自身重力作用下开始沉降回落,最终在目标位置稳定,此时整个

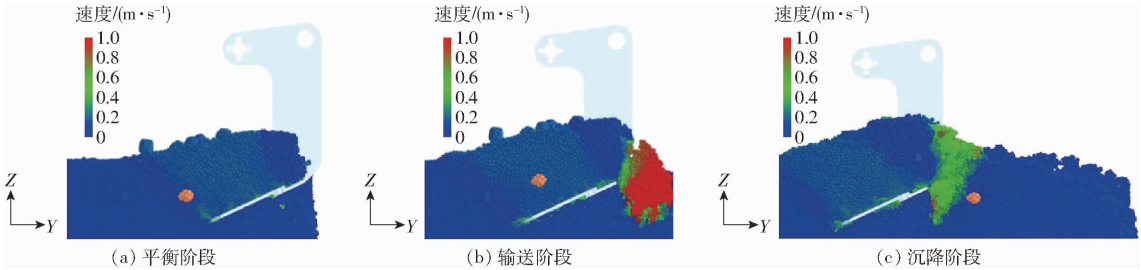


图 18 石块运动过程

Fig. 18 Motion process of rock

石块挖掘过程结束。

为了研究石块在挖掘铲和土壤共同作用下的运动规律,本研究对土壤中的一个石块进行追踪标定,以探究石块的运动规律。首先利用 EDEM 软件

Analyst 中的工具进行标记,如图 18 中的橙色石块所示,再导出所标记石块随时间变化的位置数据,最后将数据导入 Origin 2024 软件分析得到石块时间-位移曲线,如图 19 所示。

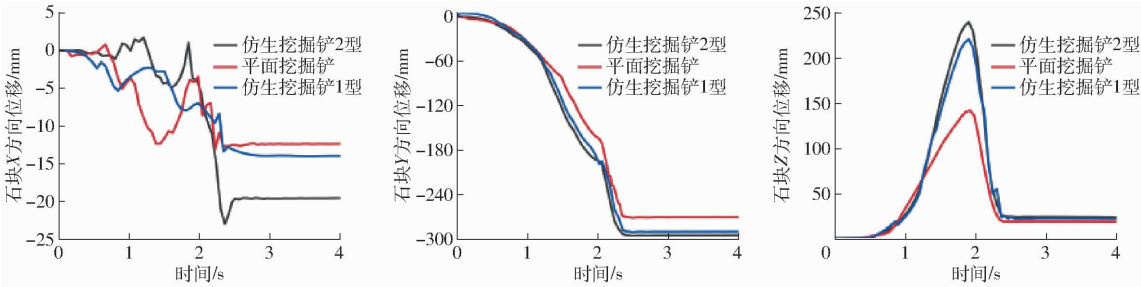


图 19 石块位移仿真曲线

Fig. 19 Simulated curves of rock displacement

由图 19 可知,石块在水平 Y 方向上坐标值变化最大,垂直 Z 方向变化次之,侧向 X 方向变化最小。对比分析平面挖掘铲和两种仿生挖掘铲 Y 方向位移可知,平面挖掘铲、仿生挖掘铲 1 型和仿生挖掘铲 2 型 Y 方向的平均位移分别为 81.98、96.06、103.45 mm,仿生挖掘铲作用下的石块平均水平位移均大于平面挖掘铲,结合图 17 分析得内侧内凹的仿生曲面能够对石块产生更明显的导向与承托作用,促使石块沿铲体前进方向实现更大的水平位移,表明仿生铲能够更有效地克服石块与周围土体之间的约束作用,改善石块运动状态,降低作业阻力,提高挖掘效率。对比平面挖掘铲和仿生挖掘铲在 X、Z 方向上的位移可知,仿生挖掘铲皆优于平面挖掘铲,平面挖掘铲、仿生挖掘铲 1 型和仿生挖掘铲 2 型 X 方向平均位移差别不大,分别为 5.76、6.08、7.78 mm,说明俯视轮廓形成前缘尖钝适中的楔形

结构不仅能对土壤进行分流作用,还能对石块产生轻微的侧向导引作用,但由于石块刚性较大,位移增量相对有限,仅表现为微小侧向位移。Z 方向平均位移分别为 52.76、75.95、80.5 mm,仿生挖掘铲 2 型在垂直方向上位移幅度最大,说明侧视轮廓通过弧形纵向曲线使石块和土壤沿铲面平稳抬升,减少垂直方向的阻力。俯视轮廓则通过楔形前缘及平顺曲率的分流设计,引导土体沿两侧滑移,使石块在垂直抬升过程中获得附加侧向导引和约束。两者协同作用使仿生挖掘铲 2 型相对平面挖掘铲在垂直位移上增大,有助于石块脱离土体约束,降低抬升阻力,从而减少能耗。

4.2.3 挖掘阻力对比分析

根据挖掘铲力学和动力学分析可知,挖掘铲阻力主要受土壤内聚力、入土角度和挖掘铲前进速度等因素共同影响。在离散元仿真中,由于土体切削

和石块挖掘过程中, Y 方向为主阻力方向, X 和 Z 方向阻力相对较小, 其变化对整体减阻趋势影响有限, 因此选用 Y 方向阻力作为主要评价指标。在仿真计算完成后, 利用 EDEM 软件中的后处理 Analyst 模块导出挖掘铲 Y 正方向阻力数据, 再导入 Origin 2024 中绘制出阻力曲线, 如图 20 所示。

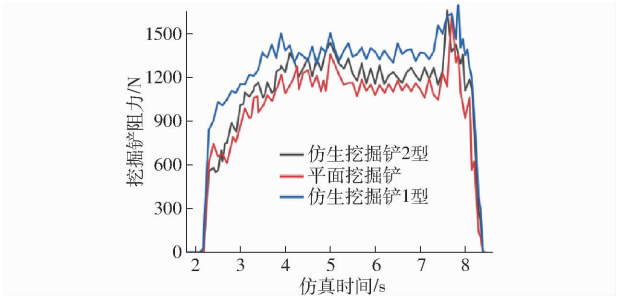


图 20 不同铲型挖掘阻力仿真曲线

Fig. 20 Simulated excavation resistance curves for different shovel types

仿生铲的减阻性能可以通过减阻率来体现, 引入减阻率指标进行表征^[36]。该指标定义为传统平面铲挖掘阻力与仿生铲挖掘阻力之间的差值与平面铲挖掘阻力的比值, 能够有效反映仿生结构在降低作业能耗方面的性能优越性。

由图 20 可知, 3 种铲型的挖掘铲在 2.2 s 铲尖接触土壤后, 阻力都开始急剧上升, 3 种挖掘铲所受阻力出现波动且逐渐上升, 平面挖掘铲在 3.9 s 后达到第 1 个阻力峰值 1 501.85 N; 在 3.9 ~ 7.1 s 时, 铲体完全进入土壤后, 挖掘铲连续作业, 3 种铲型的挖掘阻力趋于稳定, 仿生铲的降阻效果开始有明显的提升, 3 种铲型阻力都有小幅突增情况, 这是因为石块的边缘不规则性和与土壤颗粒的摩擦特性导致的局部阻力突增现象; 在 7.1 ~ 8.4 s 铲体出土阶段, 由于受仿真边界尺寸的限制, 3 种挖掘铲都呈现出短暂的大幅度阻力上升阶段, 此阶段不属于真实挖掘情况, 因此此阶段数据忽略不计; 总体来看, 与普通三角平面挖掘铲相比, 仿生挖掘铲 1 型的铲面外侧采用光滑流线型轮廓, 可有效引导土-石复合体沿铲面发生滑移和滚动, 优化了土体的流动路径, 减少了颗粒在铲面上的堆积。同时, 仿生挖掘铲 2 型在仿生挖掘铲 1 型的基础上, 俯视轮廓引入狗獾第 3 趾上缘曲线与下缘曲线的组合构成前缘尖钝适中的楔形轮廓, 平顺的曲率变化有助于引导土体沿铲体两侧滑移分流。上述结构共同作用, 显著改善了挖掘过程中的土体引导与排出效果, 大幅降低了捡石机作业过程中的挖掘阻力。根据仿真结果, 选取 3.9 ~ 7.1 s 稳定阶段计算各挖掘铲平均阻力数值, 得到仿生挖掘铲 1 型平均挖掘阻力为 1 258.82 N, 仿生挖掘铲 2 型平均挖掘阻力为 1 161.83 N, 平面

挖掘铲平均挖掘阻力为 1 373.76 N。仿生挖掘铲 1 型和仿生挖掘铲 2 型减阻率分别为 8.37% 和 15.43%。

5 田间验证试验

5.1 试验设备与方案

为了验证仿生挖掘铲是否具有良好的减阻作业效果, 在海南省儋州市农业农村部热带智能农业装备研究所进行田间阻力验证试验, 试验田为典型的红壤土质。设计并制造了小型样机进行田间试验, 该样机主要包括挖掘装置和输送链式的土石分离装置。由于主要验证的是仿生挖掘铲减阻效果, 故暂时未设置石块收集箱, 经输送链分离后的石块落回土壤表面。田间试验设备包括: 小型捡石样机、土壤紧实度测定仪、土壤水分速测仪、角度测量仪、天宇恒创 CYT-202 S 型拉力传感器、数据处理器、卷尺等。分别将两种仿生挖掘铲与平面挖掘铲以入土角 25° 安装于样机挖掘装置。

为确保田间试验的准确性, 选取平坦且具有代表性的田间地段进行试验, 单次作业距离为 25 m, 作业幅宽设定为 1 100 mm。试验地段 0 ~ 10 m 为加速区, 10 ~ 20 m 为稳定区, 20 ~ 25 m 为减速区。设定拖拉机牵引速度为 0.4 m/s, 挖掘深度为 180 mm, 以挖掘阻力作为评价指标。使用 3 个天宇恒创 CYT-202 S 型拉力传感器通过鱼眼接头拉杆将小型捡石样机和拖拉机进行三点悬挂连接, 计算机通过基于 RS-485 接口的数据处理器采集挖掘阻力, 3 种挖掘铲共设置 3 组试验, 每组试验重复进行 10 次, 取其平均值, 挖掘阻力可通过计算拖拉机牵引样机挖掘作业拉力与空行程拉力之差来得出。田间试验设备如图 21 所示。

5.2 试验结果与分析

5.2.1 挖掘阻力验证

田间试验结果如表 3 所示。根据表 3 的数据可知, 仿生挖掘铲 1 型的平均挖掘阻力为 1 384.9 N, 仿生挖掘铲 2 型的平均挖掘阻力为 1 296.4 N, 而平面挖掘铲的挖掘阻力为 1 497.7 N, 仿生挖掘铲 1 型、仿生挖掘铲 2 型的减阻率分别为 $(7.52 \pm 1.25)\%$ 和 $(13.42 \pm 1.89)\%$ 。从数据可以看出, 仿生挖掘铲 1 型和 2 型在减阻方面均显著优于平面铲, 且标准差较小, 表明试验结果重复性良好, 能够可靠反映不同铲具在田间作业条件下的作业性能差异。在相同工作条件下, 实际作业结果与虚拟仿真试验结果存在一定差异, 这主要源于仿真试验难以完全准确模拟实际田间作业环境, 同时田间试验也会受到湿度、温度等外界环境状态的影响。田间验

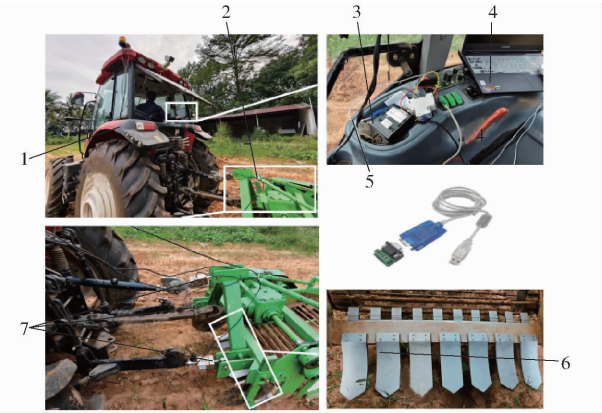


图 21 田间试验设备

Fig. 21 Field test equipment

1. 东方红 1104 型拖拉机 2. 小型捡石样机 3. 数据处理器 4. 计算机 5. RS-485 接口数据线 6. 挖掘铲 7. 天宇恒创 CYT-202 S 型拉力传感器

证结果与仿真试验得到的减阻率 8.37% 和 15.43% 相比,误差在可控范围内,验证了仿生挖掘铲的减阻效果优于平面挖掘铲,其中仿生挖掘铲 2 型的挖掘阻力最小。标准差的范围表明试验数据具有较高的重复性和可靠性。

表 3 田间阻力对比试验结果

Tab. 3 Comparison of field resistance test results

试验 序号	平面挖掘 铲阻力/N	仿生挖掘铲阻力/N		减阻率 η /%	
		挖掘铲 1 型	挖掘铲 2 型	挖掘铲 1 型	挖掘铲 2 型
1	1 505.2	1 376.2	1 305.6	8.57	13.26
2	1 494.6	1 403.4	1 293.0	6.10	13.49
3	1 505.2	1 371.0	1 303.3	8.92	13.41
4	1 529.5	1 384.1	1 292.2	9.51	15.51
5	1 488.7	1 402.3	1 322.6	5.80	11.16
6	1 484.3	1 379.6	1 247.4	7.05	15.96
7	1 440.7	1 346.3	1 284.0	6.55	10.88
8	1 529.4	1 424.6	1 288.2	6.85	15.77
9	1 492.8	1 378.2	1 322.8	7.68	11.39
10	1 506.6	1 383.4	1 304.6	8.18	13.41
平均值	1 497.7	1 384.9	1 296.4	7.52	13.42
标准差	25.28	21.23	21.69	1.25	1.89

5.2.2 土壤破碎效果对比

为比较不同挖掘铲在田间作业条件下的碎土性能,样机挖掘作业完成后,在有效工作区内观察对比分析土壤颗粒粒径状况,不同铲型的土壤碎土效果如图 22 所示。在土壤破碎与粒径分布分析中,常采用机械筛分方法对破碎后土块进行粒径分级,筛子尺寸范围被分为 3 个主要尺寸范围:粒径小于 5 mm 的小团体颗粒、5~25 mm 的中等颗粒和大于 25 mm 的大颗粒^[37]。在本研究中,根据作业土块的实际粒级特征与试验可操作性,将 10 mm 中等颗粒作为筛分阈值,以便明确区分较大未破碎块体与较细破碎

土块。每种铲型在作业后各进行 5 组重复试验,筛分结果如表 4 所示。



图 22 挖掘铲碎土效果对比

Fig. 22 Comparison of soil breaking effects of excavation shovel

表 4 挖掘铲作业后土壤颗粒筛分结果
Tab. 4 Soil particle size distribution results following excavation and shoveling operations

试验 序号	10 mm 以上土壤颗粒占比/%		
	平面挖掘铲	仿生挖掘铲 1 型	仿生挖掘铲 2 型
1	26.38	23.62	17.26
2	26.68	23.53	18.15
3	27.18	22.26	17.81
4	26.88	24.31	19.34
5	26.58	23.68	18.69
平均值	26.74	23.48	18.25
标准差	0.31	0.75	0.80

由图 22 可知,使用不同铲型作业时,土壤的碎土效果存在一定差异。仿生挖掘铲 1 型和仿生挖掘铲 2 型作业后的整体土块粒径小于平面挖掘铲,即碎土效果优于平面挖掘铲。由表 4 可知,与平面挖掘铲作业下 10 mm 以上颗粒占比 $(26.74 \pm 0.31)\%$ 相比,仿生挖掘铲 1 型、仿生挖掘铲 2 型的占比分别为 $(23.48 \pm 0.75)\%$ 和 $(18.25 \pm 0.80)\%$ 。使用仿生挖掘铲 2 型作业后 10 mm 以上土壤颗粒的粒径最少,碎土效果最为显著。这

一现象归因于仿生挖掘铲 2 型侧视和俯视内外轮廓采用的仿生曲线设计,该设计优化了土壤颗粒的流动速度,从而显著增加了土壤颗粒间、土壤颗粒与挖掘装置间的碰撞频率与动能,极大地提升了土壤破碎效果。

6 结论

(1)针对砖红壤条件下捡石机挖掘阻力大、壅土严重等问题,以狗獾前足第 3 趾结构为仿生对象,设计了两种具备复合曲面特征的仿生挖掘铲:仿生挖掘铲 1 型采用狗獾前爪第 3 趾侧视内外轮廓曲线构型;仿生挖掘铲 2 型在仿生挖掘铲 1 型基础上增加了俯视内外轮廓曲线。通过逆向工程技术精确建立两种仿生挖掘铲与石块的三维模型,并对其铲尖、土壤-石块混合物进行力学分析。

(2)基于离散元方法构建了土壤-石块-挖掘铲离散元复合体模型,设置土壤颗粒速度矢量分布和水平挖掘阻力作为性能评价指标,开展仿真试验。结果表明,两种仿生挖掘铲均能改善土壤颗粒流动

状态,减少壅土现象。其中仿生挖掘铲 2 型因引入俯视内外轮廓曲线,具备更优异的颗粒扰动与引导效果,表现出更强的减阻能力和流动控制性能,大幅降低了挖掘阻力。

(3)通过田间试验对比仿生挖掘铲 1 型、仿生挖掘铲 2 型与传统平面挖掘铲的作业性能。试验结果表明,平面挖掘铲的平均挖掘阻力为 1 497.7 N,仿生挖掘铲 1 型为 1 384.9 N,仿生挖掘铲 2 型为 1 296.4 N;仿生挖掘铲 1 型、仿生挖掘铲 2 型的平均减阻率分别为 7.52% 和 13.42%,与仿真试验减阻率 8.37% 和 15.43% 相比误差较小。通过观察对比作业后土壤粒径大小,平面挖掘铲、仿生挖掘铲 1 型、仿生挖掘铲 2 型作业下 10 mm 以上颗粒平均占比分别为 26.74%、23.48% 和 18.25%,验证了仿生挖掘铲较平面挖掘铲具有良好的碎土效果,其中仿生挖掘铲 2 型碎土效果最显著。田间试验验证了仿生挖掘铲 2 型整体工作性能优于平面挖掘铲,仿生挖掘铲的结构设计合理,可以达到黏性红壤条件下挖石过程中的减阻要求。

参 考 文 献

- [1] 张骏达,孙向阳,刘艳,等. 海南省儋州市砖红壤在中国土壤系统分类的归属研究[J]. 广东农业科学,2015,42(10):46-52.
Zhang Junda, Sun Xiangyang, Liu Yan, et al. Attribution of laterite of Danzhou, Hainan province in Chinese soil taxonomy[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(10):46-52. (in Chinese)
- [2] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1-20.
Zeng Zhiwei, Ma Xu, Cao Xiulong, et al. Application status and prospect of discrete element method in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):1-20. (in Chinese)
- [3] 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):100-111.
Zhang Zhaoguo, Xue Haotian, Wang Yichi, et al. Design and experiment of a ginseng-like excavating blade based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5):100-111. (in Chinese)
- [4] 金俊,李建桥,张广权,等. 仿生非光滑水田犁壁的设计及田间应用试验[J]. 农机化研究,2015,37(12):160-165.
Jin Jun, Li Jianqiao, Zhang Guangquan, et al. Design and field application test of biomimetic non-slippery rice paddy plow wall[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12):160-165. (in Chinese)
- [5] 李俊伟,顾天龙,李祥雨,等. 黏重黑土条件下马铃薯挖掘铲仿生减阻特性分析与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(20):1-9.
Li Junwei, Gu Tianlong, Li Xiangyu, et al. Analysis and experiment on the biomimetic drag reduction characteristics of potato excavating blade under heavy clay soil condition[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20):1-9. (in Chinese)
- [6] 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):141-145.
Zhang Jinbo, Tong Jin, Ma Yunhai. Design and experiment of biomimetic drag reduction deep tillage shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):141-145. (in Chinese)
- [7] 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):102-113.
Cao Chengmao, Liu Zhongbin, Ding Wuyang, et al. Design and experiment of ningqianhu biomimetic excavating blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):102-113. (in Chinese)
- [8] 益爱丽,廖宇兰,吕凯英,等. 一种木薯收获机仿生挖掘铲的设计方法[J]. 农机化研究,2018,40(10):63-68.
Yi Aili, Liao Yulan, Lü Kaiying, et al. Design method of a biomimetic excavating blade for cassava harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10):63-68. (in Chinese)
- [9] 肖茂华,汪开鑫,杨望,等. 基于东方蝼蛄爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):55-63.
Xiao Maohua, Wang Kaixin, Yang Wang, et al. Biomimetic rotary tiller blade design based on the oriental mole cricket's claw tips[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):55-63. (in Chinese)
- [10] 王亨泰,孙伟,王建箫,等. 根茎类中药材仿生挖掘铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(1):243-250.

- Wang Hengtai, Sun Wei, Wang Jianxiao, et al. Design and experiment of biomimetic excavating blade for rhizome-type medicinal plants[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(1): 243 – 250. (in Chinese)
- [11] 马俊,岳勇,亚森江·白克力,等. 1JS-200 型农田捡石机起石铲的仿生优化与性能提升研究[J]. 江苏农机化, 2025(1): 4 – 8.
- Ma Jun, Yue Yong, Yassenjiang Baikeli, et al. Biomimetic optimization and performance improvement of the stone lifting shovel for 1JS-200 type field stone picker[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2025(1): 4 – 8. (in Chinese)
- [12] Song W, Jiang X H, Li L K, et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105356.
- [13] Zhang L, Zhai Y B, Chen J N, 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.
- [14] 谷志新,郑文超. 狗獾前肢挖掘洞穴运动图像采集[J]. 经济动物学报, 2013, 17(3): 152 – 154.
- Gu Zhixin, Zheng Wenchao. Image acquisition of badger forelimb excavation behavior[J]. Journal of Economic Animal Science, 2013, 17(3): 152 – 154. (in Chinese)
- [15] 张琰,乔超雄,王天琪,等. 蝼蛄前足爪趾三维几何构形的减阻机理[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 309 – 315.
- Zhang Yan, Qiao Chaoxiong, Wang Tianqi, et al. Drag reduction mechanism of the three-dimensional geometric configuration of the mole cricket foreleg claw[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 309 – 315. (in Chinese)
- [16] 张强,梁留锁,张劲松. 农业机械学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 335.
- [17] 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): 33 – 42.
- Zhang Zhihong, Gan Shuaihui, Zuo Guobiao, et al. Design and discrete element simulation of biomimetic deep tillage shovel tip based on the head of a sandfish lizard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 33 – 42. (in Chinese)
- [18] 张喜瑞,曾望强,刘俊孝,等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40 – 49.
- Zhang Xirui, Zeng Wangqiang, Liu Junxiao, et al. Design and experiment of brick red soil slanting wing deep tillage shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40 – 49. (in Chinese)
- [19] 刘立晶,马超,刘忠军. 基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 74 – 83.
- Liu Lijing, Ma Chao, Liu Zhongjun. EDEM-based optimization and experiment of operational parameters for strip-type deep tillage fertilizer shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74 – 83. (in Chinese)
- [20] 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): 14 – 19.
- Wang Fa'an, Ni Chang, Zhang Zhaoquo, et al. Design and experiment of a ginseng-like excavating blade based on the forelegs of pangolin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 14 – 19. (in Chinese)
- [21] Luengo O, Singh S, Cannon H. Modeling and identification of soil-tool interaction in automated excavation[C]//Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications, 1998: 1900 – 1906.
- [22] Swick W C, Perumpral J V. A model for predicting soil-tool interaction[J]. Journal of Terramechanics, 1988, 25(1): 43 – 56.
- [23] Yu S, Song X, Sun Z. On-line prediction of resistant force during soil – tool interaction[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2023, 145(8): 081004.
- [24] Shaikh S A, Li Y, Ma Z, et al. Discrete element method (DEM) simulation of single grouser shoe-soil interaction at varied moisture contents[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106538.
- [25] Wu P, Zhang X, Zeng Z, et al. DEM simulation of subsoiling for soil disturbance as affected by soil layering and working speed[J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 7: 100385.
- [26] Barr J B, Ucgul M, Desbiolles J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1 – 15.
- [27] Sun J F, Chen H M, Wang Z M, et al. Study on plowing performance of edem low-resistance animal bionic device based on red soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104336.
- [28] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 75 – 87.
- Zhao Shuhong, Liu Hanpeng, Yang Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered deep tillage shovel for corn straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75 – 87. (in Chinese)

[29] 邢洁洁,张锐,吴鹏,等.海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J].农业工程学报,2020,36(5):158–166.
Xing Jiejie, Zhang Rui, Wu Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for laterite particles in Hainan hot region[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 158–166. (in Chinese)

[30] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等.基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J].农业工程学报,2021,37(23):100–107.
Wang Xianliang, Zhong Xiaokang, Geng Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 100–107. (in Chinese)

[31] Mohammadi M, Karparvarfard S H, Razavizadeh N, et al. Simulation of interaction between soil and rotary tiller to predict the power consumption and investigation of surface soil mixing[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 252: 106626.

[32] Li W, Li W, Cheng J, et al. Optimization design and experiment of ginger rhizome separation device based on edem-recurdyn software[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101382.

[33] 张佳喜,郑亚鹏,张虎,等.液压驱动链式农田捡石机设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(5):206–218.
Zhang Jiayi, Zheng Yapeng, Zhang Hu, et al. Design and experiment of hydraulic driven chain type field stone picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 206–218. (in Chinese)

[34] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[35] 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 of drag reduction characteristics of excavating blade for ginseng harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 179–190, 199. (in Chinese)

[36] 付善灿,王显明,常敬梓,等.基于离散元法的滩涂埋栖贝类仿生挖掘铲设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(11):134–145.
Fu Shancan, Wang Xianming, Chang Jingzi, et al. Design and experiment of bionic digging shovel for tidal flat burrowing shellfish based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 134–145. (in Chinese)

[37] Tagar A A, Adamowski J, Memon M S, et al. Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104494.

~~~~~

(上接第 53 页)

[24] 田芳,杨欣垚,孙楠清,等.基于改进 YOLO 11n – EWL 的大鲵检测模型研究[J].农业机械学报,2025,56(10):110–118.  
Tian Fang, Yang Xinyao, Sun Nanqing, et al. Giant salamander detection model based on improved YOLO 11n – EWL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 110–118. (in Chinese)

[25] 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, 2017, 39(6): 1137–1149.

[26] 朱明,汪荣,万鹏,等.基于 YOLO v8 – DBCS 的循环水养殖环境下大口黑鲈异常体表特征检测[J].华中农业大学学报,2026,45(2):269–279.  
Zhu Ming, Wang Rong, Wan Peng, et al. Detecting characteristics of abnormal body surface in *Micropterus salmoides* under recirculating aquaculture systems based on YOLO v8 – DBCS[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2026, 45(2): 269–279. (in Chinese)

[27] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer, 2018: 3–19.

[28] Hu J, Shen L, Sun G. Squeeze-and-excitation networks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE, 2018: 7132–7141.

[29] Yu Z, Huang H, Chen W, et al. YOLO – FaceV2: a scale and occlusion aware face detector[J]. Pattern Recognition, 2024, 155: 110714.