doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.002

基于穿山甲前足的三七仿生挖掘铲设计与试验

王法安[1,2]　倪　畅[1,2]　张兆国[1,2]　王博洋[1,2]

（1. 昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500；2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心，昆明 650500）

摘要：针对三七收获作业时挖掘铲存在挖掘阻力大和能耗高等问题，以穿山甲前足爪趾为仿生原型，设计了一款高效减阻仿生挖掘铲。以三七根茎及种植土壤为研究对象，计算得本征物理参数，设置Bonding键参数建立三七根茎离散元模型，分析根土黏结机理，利用Hertz-Mindlin with JKR建立三七根茎-种植土壤离散元复合模型；通过三维扫描获取穿山甲爪趾点云模型，并运用Solidworks建立仿生挖掘铲三维模型，根据爪趾三维模型设计仿生挖掘铲外形结构；对挖掘铲铲尖与铲柄进行力学分析，确定影响作业质量的设计参数；基于EDEM离散元法建立部件-土壤-作物多元仿真模型，以土壤颗粒速度矢量、土壤扰动率及挖掘阻力为评价指标进行仿真试验，得到不同指标的影响规律；通过台架试验验证仿生挖掘铲作业性能，获取仿生挖掘铲和平面挖掘铲平均挖掘阻力分别为1 171.69、1 442.36 N，平均减阻率为18.81%，台架与仿真试验结果基本一致。试验结果表明仿生挖掘铲具有良好减阻降耗特性，仿生结构设计合理，能满足酸性红土条件下三七收获挖掘作业。

关键词：三七根茎；挖掘铲；仿生；穿山甲前足爪趾；离散元法

中图分类号：S229^{+}.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S2-0010-10

Design and Experiment of *Panax notoginseng* Bionic Digging Shovel Based on Front Foot of Pangolin

WANG Faan[1,2]　NI Chang[1,2]　ZHANG Zhaoguo[1,2]　WANG Boyang[1,2]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials in of Yunnan Universities*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high digging resistance and high energy consumption of the digging shovel during the harvesting operation of Panax notoginseng, a high-efficiency drag reducing bionic digging shovel was designed with the toe of the front foot of pangolin as the bionic prototype. Taking Panax notoginseng rhizome and planting soil as research object, the intrinsic physical parameters were calculated, and the bonding key parameters were set to establish the discrete element model of Panax notoginseng rhizome. The root soil bonding mechanism was analyzed, and the discrete element composite model of Panax notoginseng rhizome planting soil was established by Hertz Mindlin with JKR. The point cloud model of pangolin′s claw toe was obtained by three-dimensional scanning, and the three-dimensional model of the bionic excavator shovel was established by using Solidworks. The shape and structure of the bionic excavator shovel were designed according to the three-dimensional model of the claw toe. The mechanical analysis of the shovel tip and handle was carried out to determine the design parameters that affected the operation quality. Based on EDEM discrete element method, the component soil crop multiple simulation model was established, and the simulation experiments were carried out with soil particle velocity vector, soil disturbance rate and excavation resistance as evaluation indexes, and the influence laws of different indexes were obtained. The operation performance of the bionic excavator was verified by bench test. The average digging resistance of the bionic excavator and the plane excavator were 1 171.69 N and 1 442.36 N, respectively, and the average drag reduction rate was 18.81%. The bench test results were basically consistent with the simulation test results. The test results

收稿日期：2024-07-20　修回日期：2024-09-08

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2002004)、云南省科技厅青年基金项目(202401AU070196)和云南省基础研究专项面上项目(202401CF070144)

作者简介：王法安(1990—)，男，讲师，博士，主要从事智能农机装备设计研究，E-mail: wfa@kust.edu.cn

通信作者：张兆国(1966—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业机械装备设计制造研究，E-mail: zzg@kust.edu.cn

showed that the bionic excavator had good characteristics of reducing resistance and consumption, and the bionic structure design was reasonable, which can meet the harvesting and excavation of Panax notoginseng under the condition of acid laterite.

Key words: *Panax notoginseng* rhizome; digging shovel; bionics; front toe of pangolin; discrete element method

0　引言

西南丘陵山区种植三七的土壤偏酸性，土质疏松，保湿性强，导致收获过程中人工作业强度较大[1-3]。机械化采挖三七能减轻劳动强度、提高收获效率，挖掘环节直接影响前进阻力、漏收率等指标。将仿生结构与离散元法相结合，是当前农机挖掘领域减阻降耗的研究热点[4-5]。目前，国内外学者对农机仿生设计已进行大量研究。李俊伟等[6]针对黏重黑土地区马铃薯挖掘铲挖掘阻力大、能耗高等问题，设计了一种仿生波纹结构的马铃薯减阻挖掘铲，降低了挖掘阻力；ZHANG 等[7]以蟋蟀前趾为仿生对象，应用结构仿生学和逆向工程方法，设计了一种适用于中国南部某茶园的四杆深松机具，实现了高效深松；肖茂华等[8]基于东方蝼蛄前足爪趾轮廓拟合曲线的特征设计了仿生旋耕刀，为旋耕刀减阻降耗和耕作能耗分析提供参考；SONG 等[9]将鼹鼠爪结构与标准深松机相结合，设计了满足土方开挖要求的仿生深松机械，减小了牵引力，增加了犁体扰动宽度；张智泓等[10]为解决传统深松机具触土部件破土困难、耕作阻力大等问题，以砂鱼蜥头部为仿生原型，采用逆向工程技术对其特殊几何特征进行提取，将量化后的几何结构特征应用于深松铲尖的设计，减少了深松铲作业阻力和能耗；王金武等[11]以狗獾爪趾作为仿生原型，设计减阻铲尖，降低了牵引阻力，同时增加了胡萝卜拔取力和漏拔率；张黎骅等[12]设计了一种基于切叶蚁上颚滑切曲线的仿生青贮玉米粉碎刀片，在提高秸秆切面平整度和降低最大切割力方面具有显著优势，减阻降耗作用明显。

本文以三七根茎及其种植土壤为研究对象，测定本征物理参数；基于仿生学原理与部件-土壤力学模型设计高效减阻仿生挖掘铲；通过离散元法建立耦合仿真模型[13]，结合试验与数据分析，探究挖掘铲在不同作业条件下对三七联合收获机作业质量的影响，以期解决挖掘阻力大、土壤扰动不足和能耗高等问题。

1　三七根茎及种植土壤本征物理参数测定

三七种植农艺要求为垄作，测量得出三七平均种植行距 150 mm，垄宽为 1 200~1 500 mm，三七根系深入土壤且分布不均匀，其垂直平均生长深度为 160 mm，如图 1 所示[14]。根深直接影响挖掘铲入土深度，土壤间黏结力与入土深度呈正相关，导致挖掘阻力随深度增加而增大，是挖掘阻力主要来源。



图 1　三七种植农艺图

Fig. 1　Agronomic map of *Panax notoginseng* planting

1.1　三七根茎本征物理参数测定

以云南省弥勒市采集的成熟 3 年期三七主根为研究对象，运用等距取样法，每隔 0.5 m 设置 1 个尺寸为 1.6 m×1.5 m（长×宽）的样方，共计 10 个；每隔 0.2 m 在内部纵向收集 1 个三七样本[15]。将三七样本洗净、擦拭后，用精度 0.01 g 电子秤测量其质量。利用量筒得出三七主根体积，三七主根密度计算式为

$$\rho_p = \frac{m_p}{v_p} \tag{1}$$

式中　ρ_p——三七主根密度，g/cm^3

m_p——三七主根质量，g

v_p——三七主根体积，cm^3

重复试验测量结果如表 1 所示。由表 1 可得，主根质量为 35.32 g，体积为 31 cm^3，密度为 1.16 g/cm^3。

表 1　三七根茎本征物理参数

Tab. 1　Intrinsic physical parameters of *Panax notoginseng* rhizome

样本	质量/g	体积/cm^3	密度/(g·cm^{-3})
1	45.61	41	1.11
2	24.79	18	1.38
3	48.95	45	1.09
4	31.54	28	1.13
5	43.04	40	1.08
6	39.13	37	1.06
7	24.53	19	1.29
8	26.79	24	1.12
9	34.92	28	1.25
10	33.85	30	1.13
平均值	35.32	31	1.16

1.2　种植土壤本征物理参数测定

三七种植土壤多呈离散化形态，构建离散元模型时，通常考虑土壤含水率、土壤颗粒半径、分级及形状

组合。为减少采样差异，将土壤含水率控制在20%，以三七采样点为圆心，布设半径0.06 m的圆形采样小方，采集深度100~200 mm内种植土壤样本，每个样本为（1 000±10）g。同时，综合考虑筛选土壤过程中，可能会导致的土壤破碎和土壤颗粒间重新黏结等问题对土壤粒径的影响，用标准筛筛分10 min，测量各级土壤总质量，求出不同粒径土壤占比。开展20组试验，结果取平均值，测得粒径小于等于0.075 mm、0.075~0.5 mm、0.5~2 mm、大于等于2 mm土壤颗粒占比分别为4.1%、19.8%、36.8%和39.3%[16]。样本筛分如图2所示。



（a）≥2 mm （b）0.5~2 mm （c）0.075~0.5 mm

图2 种植土壤标准筛筛分

Fig. 2 Standard sieve screening of planting soil

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》，考虑三七种植农艺，分别测定深度为100、200、300 mm的同一垄作种植土壤。干燥采集土壤，并记录前后质量变化，如图3所示。样本土壤含水率计算式为

$$\omega_s = \frac{m_{s1} - m_{s2}}{m_{s1}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 ω_s——土壤含水率，%

m_{s1}——土壤初始质量，g

m_{s2}——干燥后土壤质量，g

计算得不同深度土壤平均含水率分别为13.76%、20.87%和25.32%。



图3 种植土壤含水率测定

Fig. 3 Measurement of soil moisture content for planting

2 三七仿生挖掘铲设计

穿山甲进化出具有独特曲面外形的爪趾结构，拥有高效挖掘土壤性能[17]。通过对穿山甲前足爪趾进行研究，发现其共有5趾，中间第3爪趾最长，对土壤挖掘时率先触土，承担破土与挖掘任务。因此，选取前足第3趾，研究其特征结构与曲面轮廓。如图4所示，该趾外侧为光滑圆弧面，内侧为边缘上翘凹形曲面，带有从趾尖延伸至趾根的凸棱结构。趾尖端呈圆弧状楔形，能分散进入土壤时的压力、减小触土面积，降低挖掘阻力，减小应力集中，并改善应力分布。进入土壤后，内侧凸棱结构使土壤与其不平滑表面产生相对滑移，避免土壤压实于爪趾表面，进一步降低挖掘阻力。



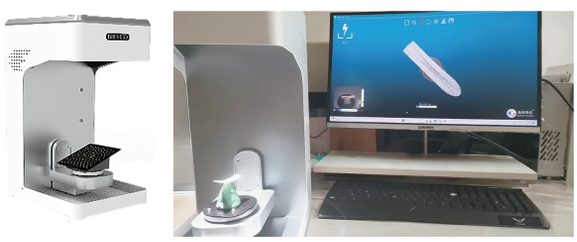
（a）外侧轮廓 （b）内侧凸棱结构

图4 穿山甲第3趾特征结构

Fig. 4 Characteristic structure of the third toe of pangolin

2.1 穿山甲爪趾三维建模

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[18]，以精准拟合穿山甲爪趾特征。利用双轴三维扫描仪扫描穿山甲前足第3趾，如图5所示。

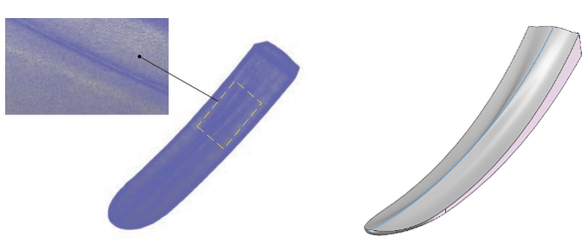


（a）三维扫描仪 （b）三维扫描

图5 穿山甲爪趾三维扫描

Fig. 5 Three dimensional scanning of the toes of pangolin

在建立网格阶段，对点云数据依次进行采样、平滑和杂点消除处理，以优化并提升数据质量[19]。运用Geomagic Design X进行填孔与封装，获得穿山甲爪趾三维模型，如图6所示。



（a）点云图 （b）三维曲面模型

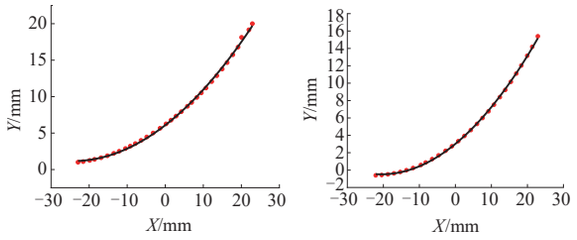
图6 穿山甲爪趾点云与三维模型

Fig. 6 Point cloud and 3D model of pangolin claw toe

为获取穿山甲爪趾内外侧结构参数，提取其内外侧曲线。在Solidworks中导入三维模型，并进行顺序取点与坐标数据测量，然后运用Origin将数据进行曲线拟合，如图7所示。得到爪趾内侧曲线y_n和外侧曲线y_w拟合方程分别为

$$y_n = 0.008\,32x^2 + 0.404\,66x + 6.083\,17 \quad (R^2=0.999\,1) \tag{3}$$

$$y_w = 0.008\,29x^2 + 0.340\,79x + 3.626\,83 \quad (R^2=0.999\,7) \tag{4}$$



（a）内侧轮廓　　（b）外侧轮廓

图7　穿山甲爪趾内外侧轮廓曲线

Fig. 7　Inner and outer contour curves of the claw toes of pangolin

决定系数表明拟合曲线能真实反映爪趾内外侧轮廓。

2.2　仿生挖掘铲结构设计

穿山甲爪趾整体呈曲面结构，其内侧凸棱是挖掘土壤时的主要特征结构之一。利用内外侧曲线拟合方程及凸棱关键参数（高度、倾斜角）构建三维模型。遵循三七农艺标准，设定挖掘铲总宽为1 500 mm，考虑铲片间隙漏土作用，设定铲片间距为60 mm，仿生铲片结构尺寸为350 mm×70 mm×10 mm（长×宽×厚）[20]。如图8所示，数模对比显示扫描三维模型与爪趾实际轮廓偏差较小，准确还原了爪趾曲面外形。内侧凸棱及边缘上翘所形成的凹面形状与真实爪趾相近，满足后续仿真试验中的减阻性能分析要求。

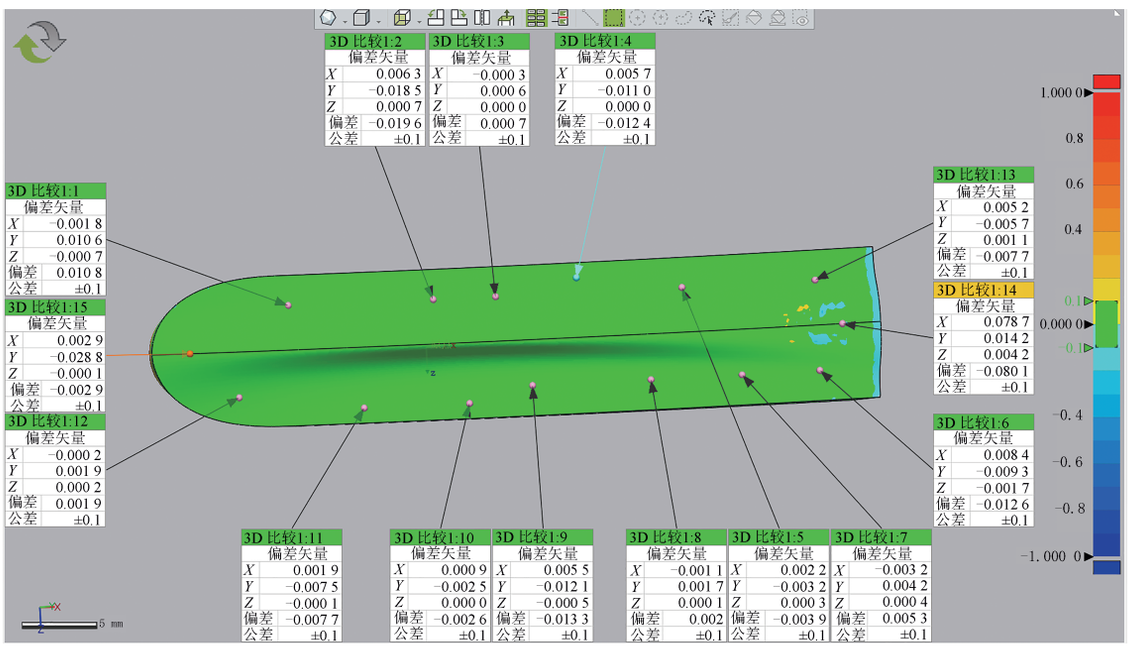


图8　数模对比

Fig. 8　Digital analog comparison

3　挖掘铲力学分析

挖掘作业时，仿生挖掘铲主要受到铲尖和铲柄部分作用力[21-22]，因此对铲尖与铲柄进行受力分析。

3.1　挖掘铲铲尖受力分析

挖掘铲工作时，铲尖部分可近似视为在土壤中水平低速运动的斜面，铲尖上方土壤受力情况如图9所示。切削土壤时，该区域土壤主要受重力和摩擦力作用，导致前端面剪切失效。鉴于土壤中碎石、草根等杂物较少，切削作用微弱，故在受力分析时不考虑切削阻力。

通过受力分析得出铲尖上方土壤在水平方向与垂直方向受力平衡方程分别为

$$N_0\left(\sin\delta+\mu'\cos\delta\right)-N_1\left(\sin\sigma+\mu\cos\sigma\right)-CS_c\cos\sigma=0 \tag{5}$$

$$N_0\left(\cos\delta-\mu'\sin\delta\right)+N_1\left(\cos\sigma-\mu\sin\sigma\right)-CS_c\sin\sigma-G=0 \tag{6}$$

式中　N_0——铲尖上方土块受到铲尖的压力，N

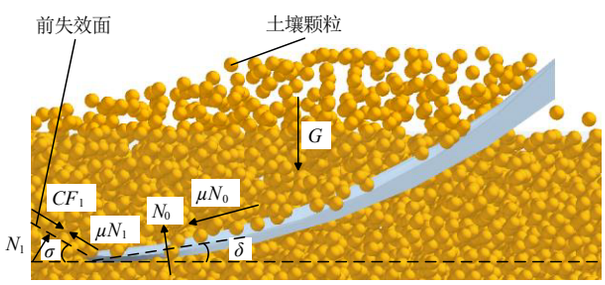


图9　铲尖上方土壤受力分析

Fig. 9　Analysis of soil stress above shovel tip

δ——挖掘铲铲尖前倾角，(°)

μ'——土壤与挖掘铲间的摩擦因数

N_1——铲尖上方土壤受到前失效面压力，N

σ——土壤前失效倾角，(°)

C——土壤内聚力，N

S_c——铲尖剪切土壤面积，mm^2

μ——土壤与深松铲间摩擦因数

G——理论土壤膨胀重力，kN

挖掘铲铲尖在切削土壤过程中,作业阻力主要来源摩擦力及土壤压力,挖掘铲上方土壤对铲尖水平作用力和垂直作用力分别为

$$W_1 = N_0(\sin\delta + \mu'\cos\delta) \tag{7}$$

$$W_2 = N_0(\cos\delta - \mu'\sin\delta) \tag{8}$$

由式(7)、(8)可得

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{G}{z} + \dfrac{CS}{z(\sin\sigma + \mu\cos\sigma)} \\ W_2 = \dfrac{G}{z'} + \dfrac{CS}{z'(\sin\sigma + \mu\cos\sigma)} \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} z = \dfrac{\cos\delta - \mu'\sin\delta}{\sin\delta + \mu'\cos\delta} + \dfrac{\cos\sigma - \mu\sin\sigma}{\sin\sigma + \mu\cos\sigma} \\ z' = 1 + \dfrac{(\sin\delta + \mu'\cos\delta)(\cos\sigma - \mu\sin\sigma)}{(\cos\delta - \mu'\sin\delta)(\sin\sigma + \mu\cos\sigma)} \end{cases} \tag{10}$$

当挖掘铲铲尖为圆弧状楔形结构时(图 10),可通过计算支撑土壤体积得出铲尖上方土壤重量为

$$G = \rho h' b_a\left[l_0 + \frac{1}{2}(l_1 + l_2)\right] \tag{11}$$

其中

$$\begin{cases} h' = \dfrac{\sin(\delta + \sigma)}{\sin\sigma}h \\ l_1 = \dfrac{\cos(\delta + \sigma)}{\sin\sigma}h \\ l_2 = \dfrac{\sin(\delta + \sigma)\tan\alpha}{\sin\sigma}h \end{cases} \tag{12}$$

式中 ρ——土壤密度,kg/m^3

α——铲柄刃角,(°)

δ——挖掘铲铲尖前倾角,(°)

b_a——铲刀平均宽度,mm

l_0——挖掘铲上表面长度,mm

土壤前剪切失效面面积S计算式为

$$S = \frac{hl}{\sin\sigma} \tag{13}$$

其中

$$\sigma = \frac{\pi - 2\arctan\mu}{4} \tag{14}$$

式中 h——挖掘深度,mm

l——铲尖前端弧长,mm

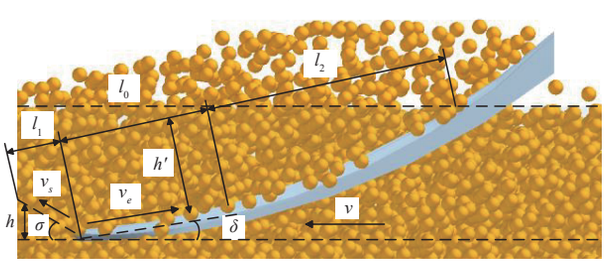


图 10 铲尖上方土壤尺寸及运动情况

Fig. 10 Soil size and movement above shovel tip

3.2 挖掘铲铲柄受力分析

铲柄对其两侧土壤主要产生切削作用,土壤对铲柄作用力如图 11 所示,铲体前端刃口为楔刃,铲柄侧铲为平行刀刃。

土壤作用于铲柄的力主要包括楔刃的法向力与切向力,以及铲柄侧向力产生的阻力分量,共同构成土壤对铲柄的阻力,表示为

$$W_3 = 2\left(N_2\sin\frac{\alpha}{2} + N_2\mu'\cos\frac{\alpha}{2} + N_3\mu'\right) \tag{15}$$

式中 W_3——铲柄水平方向总阻力,N

N_2——楔刃法向载荷,N

N_3——侧铲法向载荷,N

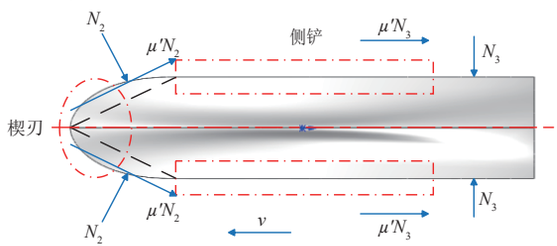


图 11 挖掘铲铲柄受力分析

Fig. 11 Force analysis of shovel handle

土壤变形阻力与楔刃及侧铲的法向载荷N_2和N_3有关,具体关系为

$$\begin{cases} N_2 = K_1'S_1' \\ N_3 = K_2'S_2' \end{cases} \tag{16}$$

其中

$$K_1' = K_{ed} + K_{pd} \tag{17}$$

$$K_{ed} = K_2'\frac{1}{\cos\dfrac{\varphi'}{2}} \tag{18}$$

式中 K_1'——土壤变形比阻,Pa

S_1'——铲柄楔刃面积,m^2

K_2'——土壤比压,Pa

S_2'——铲柄侧铲面积,m^2

K_{ed}——土壤弹性形变应力,Pa

K_{pd}——土壤塑性形变应力,Pa

φ'——铲刃倾角,(°)

挖掘铲铲刃固定,且μ'、α、S_1'、S_2'已知,仅K_1'、K_2'未知。

铲柄切削土壤时,土壤在侧铲周围产生塑性流动,侧铲仅受土壤弹性恢复力产生的压力;比压仅源于土壤弹性变形。挖掘铲铲柄宽度超过 0.3 cm 时,K_{ed}为 4 500 Pa,其中K_{ed}=k'/T,k'为常数 200。土壤平均变形量计算式为

$$T = \frac{b_a}{4\cos\left(\dfrac{\varphi'}{2} + \lambda\right)} \tag{19}$$

式中 T——土壤平均变形量,mm

λ——土壤与金属摩擦角,(°)

整理式(19)可得仿生挖掘铲铲柄受力为

$$W_3 = 2\left(K_1'S_1'\sin\frac{\varphi'}{2} + K_1'S_1'\mu'\cos\frac{\varphi'}{2} + K_2'S_2'\mu'\right) \tag{20}$$

土壤平均变形量T为 0.018 3 mm,据此求得塑性形变应力K_{pd}为 10 928.96 Pa,土壤变形比阻K_1'为 14 826.07 Pa,S_1'为 0.008 m^2,S_2'为 0.016 m^2。

4　仿真试验

土壤具有离散结构特性，基于EDEM构建部件-土壤-作物耦合仿真模型[23]。该模型以挖掘阻力为关键评价指标，模拟挖掘铲在常规工况下的田间作业状态，解析影响装置性能的主要因素。

4.1　离散元模型建立

4.1.1　三七根茎离散元模型

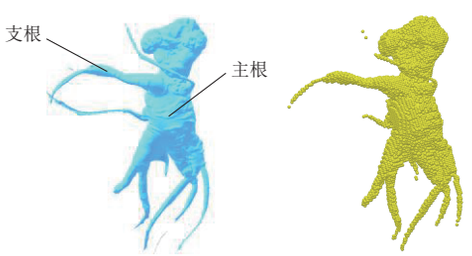
三七根茎由主根和支根构成，受多因素影响导致成熟后形状不规则，支根绵密细长且与土壤缠绕，特征提取困难。为降低扫描难度，先将多余支根剪去，并粘贴定位贴纸于主根表面进行尺寸定位识别，以保证形状、轮廓、尺寸与实物一致。在建立三七主根模型后，因支根与土壤相互缠绕，通过Solidworks曲线扫描命令建立支根模型。为模拟收获时出现破碎损伤，选取Hertz-Mindlin with Bonding模型进行颗粒填充，参考根茎作物物料设置[24]，得到三七Bonding键参数如表2所示。

表2　三七Bonding键参数

Tab. 2　*Panax notoginseng* bonding key parameters

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	3.26×10^{8}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	2.17×10^{8}
临界法向应力/Pa	2.27×10^{6}
临界切向应力/Pa	9.65×10^{6}
粘结半径/mm	0.1

为平衡仿真周期与效率，针对构建三七根茎离散元模型，设置10 738个半径为1 mm的颗粒来填充三七主根与支根壳体，如图12所示。



(a) 三维模型　　(b) 颗粒填充

图12　三七根茎离散元模型

Fig. 12　Discrete element model of *Panax notoginseng* rhizome

4.1.2　土壤颗粒离散元模型

土壤颗粒主要包括粒状、团粒状、片状和柱状结构，如图13所示。在EDEM中对4种土壤颗粒进行设置[25]，并通过颗粒工厂在土槽中进行填充。为确保仿真土壤与实际情况相符，4种土壤颗粒模型占比分别为23.93%、39.31%、17.62%和19.14%。

鉴于土壤间及土壤与触土部件材料间存在较大黏结力，采用Hertz-Mindlin with JKR模型对试验土壤进行模拟。该模型计算法向阻尼力、切向阻尼力、切向力的方法与Hertz-Mindlin接触模型相同，由相互作用参数、重叠量η及表面能γ决定颗粒间法向接触力，可得

$$\begin{cases} F_{\mathrm{JKR}} = -4\sqrt{\pi\gamma E_q}\, r^{\frac{3}{2}} + \dfrac{4E_q}{3R_q} r^3 \\ \eta = \dfrac{r^2}{R_q} - \sqrt{\dfrac{4\pi\gamma r}{E_q}} \\ \dfrac{1}{E_q} = \dfrac{1-\nu_i^2}{E_i} + \dfrac{1-\nu_j^2}{E_j} \end{cases} \tag{21}$$

式中　F_{JKR}——JKR模型颗粒间法向接触力，N

r——颗粒间接触半径，mm

η——重叠量，mm

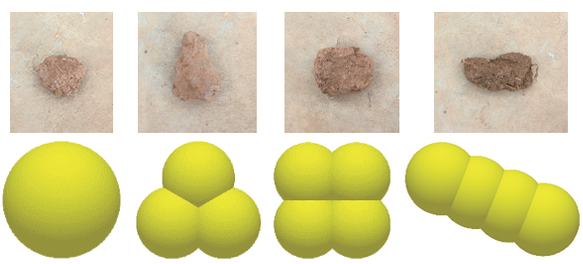
E_q——等效杨氏模量，MPa

R_q——颗粒等效接触半径，mm

γ——土壤颗粒表面能，J/mm^2

E_i、E_j——接触球杨氏模量，MPa

ν_i、ν_j——接触球泊松比



(a) 粒状　(b) 团状　(c) 片状　(d) 柱状

图13　土壤颗粒离散元模型

Fig. 13　Discrete element models of soil particles

在加载和卸力阶段，法向力都遵从上述方程，当γ=0时，Hertz-Mindlin法向力为

$$F_{\mathrm{Hertz}} = \frac{4}{3} E_q \sqrt{R_q}\, \eta^{\frac{3}{2}} \tag{22}$$

式中　F_{Hertz}——Hertz-Mindlin接触模型法向力，N

JKR模型能在粒子无物理接触时提供内聚力，其非零力粒子间的最大间隙η_c计算式为

$$\eta_c = -\sqrt{\frac{4\pi\gamma r_c}{E_q}} + \frac{r_c^2}{R_q} \tag{23}$$

其中

$$r_c = \left[\frac{9\pi\gamma R_q^2}{2E_q}\left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{24}$$

$$\frac{1}{R_q} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{25}$$

式中　η_c——具有非零力粒子间最大间隙，mm

r_c——临界接触半径，mm

R_i、R_j——相邻土壤颗粒接触半径，mm

当$\eta<\eta_c$时，模型返回力为0；而颗粒无物理接触且分离间隙小于η_c的条件下，内聚力将达到最大值，计算式为

$$F = \begin{cases} -\dfrac{3}{2}\pi\gamma R_q \\ 2\pi\gamma\cos\varepsilon\sqrt{R_i R_j} \end{cases} \tag{26}$$

式中　F——土壤颗粒内聚力，N

ε——土壤颗粒润湿角,(°)

式(26)计算摩擦力时主要受由JKR法向力产生的正排斥力影响,JKR摩擦模型在接触力内聚分量较高时提供较大摩擦力,使用JKR模型模拟湿颗粒时,由湿润角与液体表面张力决定分离两颗粒所需力。

4.1.3 离散元土槽建立与基本参数设置

选择适当接触力学模型对根土复合物黏结作用的分析至关重要,直接影响挖掘铲与颗粒间的相互作用,土壤颗粒基本参数如表3所示[26]。

表3 土壤颗粒基本参数

Tab. 3 Basic parameters of soil particles

参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.37
土壤颗粒剪切模量/Pa	1×10^7
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1350
土壤-土壤静摩擦因数	0.53
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.46
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.15
土壤-土壤表面能/(J·m^{-2})	14.88
土壤颗粒半径/mm	5
土壤-45钢静摩擦因数	0.59
土壤-45钢滚动摩擦因数	0.57
土壤-45钢碰撞恢复系数	0.058
土壤-45钢表面能/(J·m^{-2})	7.02

为模拟三七收获实际作业状态,建立尺寸(长×宽×高)为1 200 mm×600 mm×300 mm的虚拟土槽。设定颗粒工厂以静态方式生成土壤颗粒,使其仅在重力作用下自由沉降,并在最大速度稳定时停止生成,以保证土壤模型压实且土槽内存有充足颗粒,使仿真土壤与实际土壤保持一致。

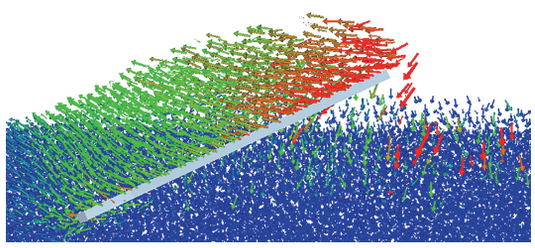
4.2 虚拟仿真试验与评价指标

土槽创建完成后,将挖掘铲模型导入EDEM,根据云南省三七种植模式与农艺要求,设定挖掘深度为200 mm;综合考虑入土角对挖掘铲入土性能、三七根系-土壤复合体等介质移动速度和挖掘阻力的影响,设定入土角为25°;考虑到作业速度是影响三七收获机收获效果与驾驶安全性的主要因素之一,结合自走式根茎类收获机械挖掘作业速度,设定前进速度为0.8 m/s[27],并添加Linear-Translation运动。为确保仿真连续性,固定时间步长设为20%Rayleigh时间步长,仿真总时长为2s。

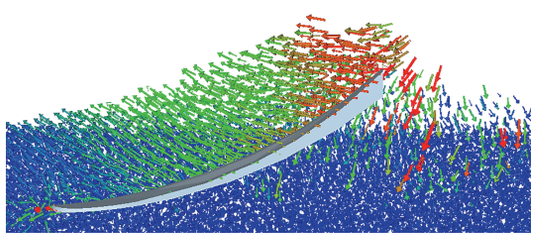
4.2.1 土壤颗粒速度场

挖掘机构仿形能力越强,对土壤刚性冲击越强,土壤颗粒受冲击后平均速度越大。在挖掘铲稳定作业阶段,用矢量形式表示扰动土壤颗粒速度场,2种挖掘铲扰动土壤颗粒速度矢量情况如图14所示,箭头方向与长度分别表示速度方向与大小。

土壤颗粒在铲尖作用下开始运动,直至达到稳定状态。由图14可知,土壤颗粒在平面铲中后段速度较快,尖端较慢;而仿生铲尖端土壤颗粒速度较大。入土初期,仿生铲尖阻力增长快于平面铲尖,有利于在挖掘时穿透土壤表层。箭头方向显示,仿生铲尖中后段土壤颗粒朝弧形铲柄圆心方向运动,高速土壤颗粒多,具有更好抬升效果;平面铲中后段易堆积不断挤压挖掘铲的土壤颗粒,阻碍前进并增大垂直力。平面铲尖端土壤颗粒分布均匀,运动方向一致;而仿生铲尖端,因与土壤颗粒接触面积较小且集中于铲尖前端,颗粒运动方向随仿生曲面变化,内侧凸棱增加流动性,分散堆积,降低垂直力。



(a) 平面挖掘铲



(b) 仿生挖掘铲

图14 土壤颗粒速度场

Fig. 14 Soil particle velocity field

4.2.2 土壤扰动

土壤扰动定义为挖掘铲破坏局部表层土壤,并引起土壤内部松动、移动和混合,可以增加土壤孔隙度、促进水分和养分传输,但较大土壤扰动会导致牵引阻力过大。离散元模型中挖掘后地表土壤隆起情况的纵向截面和横向截面如图15所示。土壤水平面以上外轮廓曲线与水平线围成的面积,即为土壤膨胀面积S_i,土壤扰动率计算式为

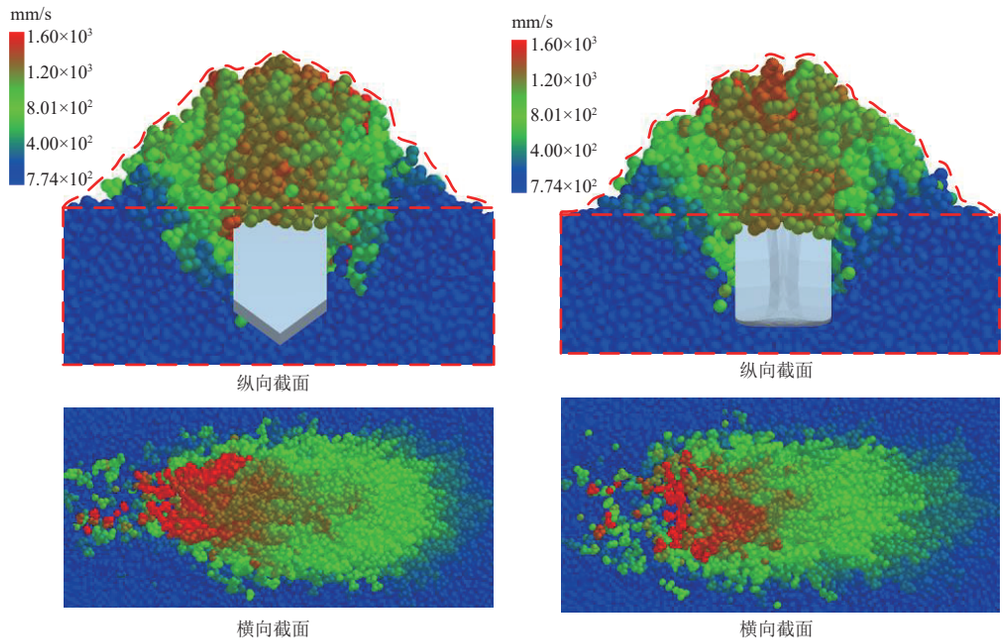
$$Q=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{S_0}\times100\% \tag{27}$$

式中 Q——挖掘后土壤扰动率,%

n——仿真试验次数

S_0——土壤模型原始横截面积,mm^2

由图15可知两种挖掘铲在作业过程中对土壤结构造成明显扰动,挖掘土壤与未挖掘土壤之间产生较强内部剪切力,土层扭曲变形,土壤孔隙度逐渐增大。由于扰动,内部土壤颗粒产生大量动能,随着挖掘铲提升土壤,红色高速区域转移到上层表面,仿生挖掘铲红色高速区域都小于平面挖掘铲,表明作业过程中对土壤进行了扰动,具备更低牵引阻力。计算仿生挖掘铲和平面挖掘铲土壤扰动率分别为38.23%和34.71%。



（a）平面挖掘铲　　（b）仿生挖掘铲

图 15　土壤颗粒扰动情况

Fig. 15　Disturbance of soil particles

4.2.3　挖掘阻力

挖掘阻力主要受土壤附着力、根土粘结力和入土角等因素影响。通过 EDEM 的 Analyst 后处理模块，导出单个铲片挖掘总阻力，并导入 Origin 绘制阻力曲线，如图 16 所示。

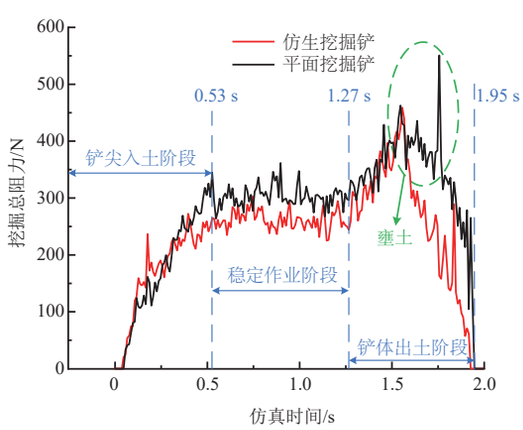


图 16　挖掘阻力仿真曲线

Fig. 16　Excavation resistance simulation curves

由图 16 可知，挖掘铲铲尖接触土壤后，挖掘阻力开始波动且逐渐上升，在 0.53 s 时达到第 1 个峰值 344.75 N，随后铲体完全进入土壤中作业，保持连续作业，阻力逐渐稳定；在 1.27~1.95 s 时挖掘阻力因壅土现象呈二次上升趋势，相较平面挖掘铲，仿生铲面外侧光滑曲面轮廓与内侧凸棱结构使根土复合体产生破碎、滑移和滚动，具备较好结构引流作用，能减少铲面承载的土壤颗粒数量与壅土现象，大幅降低挖掘阻力，计算得减阻率为 15.67%。

5　台架试验

5.1　试验方案

为验证挖掘铲作业性能，试验区土质为红壤，将土壤含水率分别设定为 15%、20% 和 25% 以模拟不同作业环境条件，进行 3 组对比试验。试验设备：轮辐式拉压力传感器、PLC 控制器、数据采集系统、土壤紧实度测定仪、角度测量仪、卷尺等，分别将仿生挖掘铲与平面挖掘铲以入土角 25° 安装于土槽台车悬挂装置，台架试验装置如图 17 所示。

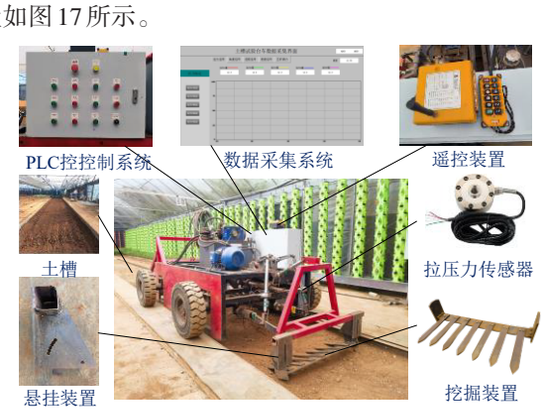


图 17　台架试验装置

Fig. 17　Bench test device

为保证试验准确性，选取土槽平坦地段进行试验，单次作业距离为 20 m，设定土槽 0~5 m、5~15 m 和 15~20 m 分别为加速区、有效区和减速区；设定台车牵引速度为 0.8 m/s，以挖掘阻力作为评价指标[28]。将轮辐式拉压力传感器固定在左右拉杆，通过基于 RS485 接口的 Modbus-RTU 通信协议的数据采集系统采集装置挖掘阻力，每组试验重复进行 5 次，求取平均值，台架试验过程

如图18所示。

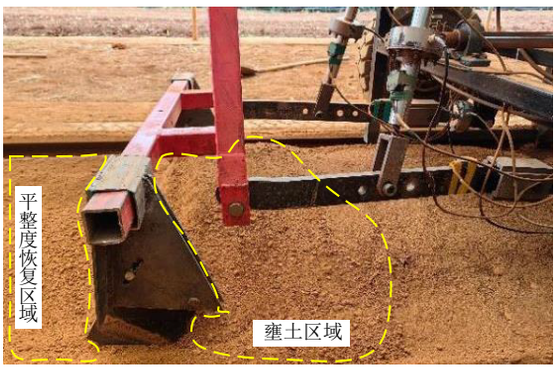


图18 台架试验过程

Fig. 18 Bench test process

5.2 台架试验结果

台架试验结果如表4所示。由表4可知，仿生挖掘铲平均挖掘阻力为1 171.69 N，平面挖掘铲挖掘阻力为1 442.36 N，平均减阻率为18.81%。相同工况下，挖掘铲实际作业质量与虚拟仿真试验结果存在差异，产生误差原因是仿真模型难以完全准确模拟实际试验情况且台架试验受外界环境条件状态变化影响。

与平面挖掘铲相比，仿生挖掘铲铲尖破土时，土壤沿铲体内侧凸棱做变加速运动并沿铲尖上端飞出，减少能量损失以达到减阻效果。同时，铲柄在土壤中滑动，破坏土壤与三七间的黏附，减小黏附面积，提高土壤扰动率及蓬松度，降低三七漏收率以满足三七收获要求。

表4 台架性能对比试验结果

Tab. 4 Bench performance comparison test results

含水率/%	序号	挖掘阻力/N		减阻率/%
		平面挖掘铲	仿生挖掘铲	
15	1	1 175.31	957.92	18.50
	2	1 093.42	896.87	17.98
	3	1 208.47	970.01	19.73
	4	1 045.13	843.69	19.27
	5	1 156.48	939.25	18.78
	均值	1 135.76	921.55	18.85
20	6	1 451.46	1 136.75	21.68
	7	1 503.78	1 209.62	19.56
	8	1 443.71	1 158.26	19.77
	9	1 492.15	1 229.85	17.58
	10	1 512.36	1 199.28	20.70
	均值	1 480.69	1 186.75	19.86
25	11	1 687.95	1 384.56	17.97
	12	1 732.63	1 394.27	19.53
	13	1 810.31	1 475.25	18.51
	14	1 692.84	1 411.37	16.63
	15	1 629.46	1 368.43	16.02
	均值	1 710.64	1 406.78	17.73
	总均值	1 442.36	1 171.69	18.81

6 结论

（1）针对三七收获时挖掘阻力大的问题，对其根茎及种植土壤进行物理参数测定，以穿山甲前足第三趾为仿生原型设计减阻挖掘铲，通过逆向工程技术精确建立仿生挖掘铲三维模型，并对其铲尖与铲柄进行受力分析。

（2）通过离散元法建立部件-土壤-作物多元仿真模型，以土壤颗粒速度矢量、土壤扰动率及挖掘阻力为评价指标进行仿真试验。仿真试验结果表明，仿生挖掘铲能分散土壤堆积，增加土壤颗粒流动性从而减少垂直力与牵引力，且仿生结构具备出色的结构引流作用与更优土壤扰动性能，能减少铲面承载的土壤颗粒数量，从而降低壅土现象的出现概率，使挖掘阻力大幅度减小。

（3）台架试验结果与仿真试验结果基本一致，试验结果表明，平面挖掘铲平均挖掘阻力为1 442.36 N，仿生挖掘铲平均挖掘阻力为1 171.69 N，平均减阻率为18.81%，仿生挖掘铲综合作业性能优于平面挖掘铲，可以满足三七收获农艺要求。

参 考 文 献

[1] JIANG D L, LIU Y, LIN Z A, et al. Effects of combined infrared and hot-air drying on ginsenosides and drying characteristics of *Panax notoginseng* (Araliaceae) roots[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 267 - -276.

[2] LIN Y H, ZHANG F J, LI L X, et al. Identification of *Panax notoginseng* powder in different parts based on the electronic nose and time-domain feature extraction[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(4): 047510 - 047519.

[3] 王法安，温博，谢晓红，等. 三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊1)：201 - 211，259.

[4] 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. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 - 20. (in Chinese)

[5] 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 *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100 - 111. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 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 & Tillage Research, 2022, 220: 105375.

[8] 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. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of *Gryllotalpa orientalis Burmeister*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2): 55－63. (in Chinese)

[9] SONG W, JIANG X H, LI L K, et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil & Tillage Research, 2022,220:105356.

[10] 张智泓,甘帅汇,左国标,等.以砂鱼蜥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. Bionic design and performance experiment of Sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):33－42. (in Chinese)

[11] 王金武,李响,高鹏翔,等.胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):93－103.
WANG Jinwu, LI Xiang, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of high efficiency drag reducing shovel for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):93-103. (in Chinese)

[12] 张黎骅,罗惠中,周杨,等.青贮玉米切叶蚁上颚仿生粉碎刀片设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(12):48－56.
ZHANG Lihua, LUO Huizhong, ZHOU Yang, et al. Design and test of bionic crushing blade based on the mandible of the leaf-cutter ant for harvesting silage maize[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(12):48－56. (in Chinese)

[13] 夏春龙.板蓝根挖掘装置设计与试验[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.
XIA Chunlong. Design and test of *Banlangen* digging device[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[14] 张兆国,邓寓轩,王法安,等.自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J].农业机械学报,2023,54(9):164－177.
ZHANG Zhaoguo, DENG Yuxuan, WANG Faan, et al. Trafficability analysis and scaling model experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):164－177. (in Chinese)

[15] 解开婷.三七根土复合体分离机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
XIE Kaiting. Study on separation mechanism of *Panax notoginseng* root soil complex[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[16] 王法安,曾悦,张兆国,等.三七种植土壤离散元仿真模型参数标定[J].华南农业大学学报,2024,45(4):588－597.
WANG Faan, ZENG Yue, ZHANG Zhaoguo, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for *Panax notoginseng* planting soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(4): 588－597. (in Chinese)

[17] 乔屹涛.铲式挖掘部件仿生设计及减阻脱附性能研究[D].太原:太原理工大学,2022.

[18] 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.

[19] 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 Ning-guo *Radix peucedani* bionic digging shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):102－113. (in Chinese)

[20] 张兆国,王一驰,李汉青,等.液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(6):127－135,158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):127－135,158. (in Chinese)

[21] 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 iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):40－49. (in Chinese)

[22] 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 parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74－83. (in Chinese)

[23] 万里鹏程,李永磊,黄金秋,等.根茎类作物单摆铲栅收获装置驱动转矩特性研究[J].农业机械学报,2022,53(Supp.1):191－200,339.
WAN Lipengcheng, LI Yonglei, HUANG Jinqiu, et al. Driving torque characteristics of oscillating slat shovel grid for rhizome crops harvest device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 191－200, 339. (in Chinese)

[24] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):61－70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61－70, 91. (in Chinese)

[25] ZHANG P C, LI F G, WANG F Y. Optimization and test of ginger-shaking and harvesting device based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108257.

[26] 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 subsoiler with maize straw returned to filed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75－87. (in Chinese)

[27] 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 Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Analysis and experiment on drag reduction characteristics of digging shovel of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 179－190, 199. (in Chinese)

[28] 秦宽,郎旭涛,沈周高,等.茶园仿生往复式开沟松土机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):29－39.
QIN Kuan, LANG Xutao, SHEN Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 29－39. (in Chinese)