

低阻力三七挖掘复合仿生铲设计与试验

王成琳 赵则栋 李鹏飞 潘韦宇 张兆国 刘伟健

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要:三七作为云南地区名贵中药材,其机械化收获存在挖掘阻力大的问题,减小挖掘阻力对提高三七机械化收获效率具有重要意义。针对这一问题,本文设计了一种新型复合仿生铲。通过理论分析确定了影响复合仿生铲挖掘阻力的因素:仿生刀长度、宽度和高度,铲体宽度、长度和铲刃斜角,结合上述因素和标定试验获得的物理参数,使用 Hertz - Mindlin (no-slip) 模型设计正交试验,得出挖掘阻力最小的复合仿生铲结构参数组合。设计跟踪颗粒位移流向的仿真试验,评估所提出的复合仿生铲减阻能力和挖掘效果。采用正交试验方法进行现场试验,确定了复合仿生铲最佳工作参数组合:入土角为 15°,前进速度为 0.3 m/s,铲片中心间距为 80 mm;得到复合仿生铲的平均挖掘阻力为 1 094.51 N,与平面铲、二阶铲和组合铲相比分别降低了 25.30%、19.55% 和 10.76%。以上结果表明,所提出的复合仿生铲能够满足降低挖掘阻力、提高三七中药材机械化收获效率的需求。

关键词: 三七挖掘铲; 复合仿生铲; 挖掘阻力; 离散元仿真; 正交试验

中图分类号: S220; S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)01-0239-13

OSID:



Design and Experiment of a Low-resistance Composite Bionic Digging Shovel for *Panax notoginseng*

WANG Chenglin ZHAO Zedong LI Pengfei PAN Weiyu ZHANG Zhaoguo LIU Weijian

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: *Panax notoginseng* is a valuable traditional Chinese medicine in Yunnan. The mechanized harvesting of *Panax notoginseng* has severe digging resistance. Reducing digging resistance has a significant impact on improving the efficiency of mechanized harvesting of *Panax notoginseng*. To address this issue, a composite bionic shovel was proposed. The factors affecting the digging resistance of composite bionic shovel were determined through theoretical analysis as follows: the length, width and height of the bionic knife, the width, length and bevel angle of the shovel blade. By combining the above factors and the physical parameters obtained from the calibration test, an orthogonal test was designed by using the Hertz - Mindlin (no-slip) model. The combination of composite bionic shovel structural parameters with the smallest digging resistance was obtained. Simulation tests of tracking the particle displacement flow direction were designed to evaluate the resistance reduction capability and excavation effect of the proposed composite bionic shovel. Based on verifying the simulation test through field tests, the best combination of working parameters of the composite bionic shovel was determined by using orthogonal test methods in the field test under the shed environment of the team as follows: the entry angle was 15°, the forward speed was 0.3 m/s, and the center distance of the shovel blade was 80 mm. The composite bionic shovel exhibited an average digging resistance of 1 094.51 N. This value was reduced by 25.30%, 19.55%, and 10.76% compared with the following shovels that were effective in *Panax notoginseng* excavation: the flat shovel, second-order shovel, and combination shovel, respectively. The above results showed that the proposed composite bionic shovel can meet the requirements of reducing the digging resistance and improving the mechanized harvesting efficiency of *Panax notoginseng*.

Key words: *Panax notoginseng* digging shovel; composite bionic shovel; digging resistance; discrete element simulation; orthogonal test

收稿日期: 2025-04-13 修回日期: 2025-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002004)、云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(KKXX202423055)和云南省基础研究专项面上项目(202401CF070144)

作者简介: 王成琳(1986—),男,副教授,博士,主要从事智能农业机械装备设计研究,E-mail: wangCL86@kust.edu.cn

通信作者: 张兆国(1966—),男,教授,博士,主要从事智能农业机械装备设计研究,E-mail: zzg@kust.edu.cn

0 引言

三七 (*Panax notoginseng*) 属于根茎类作物, 主要生长在中国云南地区, 属于一种名贵中药材^[1]。目前三七主要的收获方式仍然是人工挖掘, 劳动强度大且挖掘效率较低^[2]。三七的机械化收获可以降低农民的劳动强度, 提高三七收获效率, 但目前存在挖掘阻力较大的问题, 因此, 降低三七收获机挖掘阻力, 是促进三七机械化收获、提高三七采挖效率的重要途径^[3]。

众多学者在挖掘铲减阻领域进行了大量研究, 提出了许多降低挖掘阻力的方法, 如仿生、振动、改良表面结构和润滑等方法^[4-6]。其中, 采用仿生学方法, 使用生物结构的优越性能来提高农机具的工作性能, 是一种降低挖掘阻力的创新而有效的方法。

通过对前人研究的总结和分析可知, 使用仿生方法以降低挖掘铲挖掘阻力主要有提高其破土能力和增强脱附能力 2 种途径。许多学者使用仿生方法, 在提高农机具的土壤破碎能力方面进行了深入研究。文献[7-9]将有利于破土的生物结构应用到农机具结构中, 提高了农机具的破土能力, 验证了提高挖掘铲的破土能力在降低挖掘阻力方面有显著效果。仿生方法在脱附减阻领域也得到了广泛应用, 研究者将有利于减少土壤黏附的生物结构应用到农机具上, 从而提高了农机具的脱附减阻能力, 表明提高挖掘铲的脱附能力是减少挖掘阻力的有效方法^[10-13]。

上述研究表明, 仿生方法在农业机械上的应用显著提升了农机具的作业性能与效率, 这为三七收获机挖掘铲的仿生设计提供了丰富经验和理论依据。然而, 目前对三七挖掘铲减阻的研究主要集中在脱附方面, 且大多属于单一生物仿生方法的应用, 对于将破土能力和脱附能力相结合的复合仿生方法的研究还不够充分和深入。由于三七种植地区土壤黏重, 挖掘过程中土壤结构不易分散, 在挖掘铲表面易造成壅土现象, 增加挖掘阻力^[14]。因此, 本文提出一种将生物的破土能力和脱附能力结合的复合仿生式三七挖掘铲, 以降低三七收获机收获过程中的挖掘阻力。

首先应用三面楔原理, 构建挖掘铲力学分析模型, 确定影响复合仿生铲挖掘阻力的因素。使用 TMS-PRO 专业食品特性分析仪对三七和土壤进行物理参数标定, 利用离散元方法, 使用三维扫描仪获得三七的轮廓特征模型并构建土壤和三七的离散元模型^[15-16], 结合上述影响复合仿生铲挖掘阻力的因素和标定试验获得的物理参数, 在 EDEM 中使用

Hertz-Mindlin(no-slip)模型构建土壤-挖掘铲和土壤-三七-挖掘铲仿真模型进行仿真试验, 通过设计正交试验, 得出挖掘阻力最小的复合仿生铲结构参数组合^[17-18]。设计跟踪颗粒位移流向仿真试验, 分别对土壤和三七颗粒进行空间轨迹跟踪, 评估所提出的复合仿生铲减阻能力和三七挖掘效果。在通过现场试验验证仿真试验的基础上及团队的土槽大棚环境中, 设计六因素五水平正交试验进行现场试验, 最终确定复合仿生铲最佳工作参数组合, 并得到复合仿生铲、平面铲、二阶铲和组合铲的平均挖掘阻力, 以期满足提高三七中药材机械化收获效率、降低挖掘阻力的需求。

1 复合仿生铲设计

1.1 总体设计

在长期的自然选择和进化过程中, 动物进化出了有利于减少附着力的体表结构, 以适应环境^[19-20]。鲨鱼背鳍具有良好的流线型, 在水中游动时可通过破水减小游动阻力, 当选用鲨鱼背鳍结构作为仿生刀原型时, 仿生刀的凸起结构使根茎两侧的土壤应力发生变化, 两侧土壤更易达到破裂状态, 且鲨鱼背鳍的流线型能很好地切断土壤, 有助于提高挖掘过程中铲尖的破土能力, 背鳍两侧能对破裂的土壤起到良好的引流作用, 从而达到在土壤介质减小阻力的效果^[21]。野猪头部的弧形结构适合通过挖掘的方式寻找地下食物, 头部的口部和额叶部分有利于土壤脱落, 并在挖掘过程中提供良好的脱附特性^[22]。因此, 采用逆向工程方法, 将鲨鱼背鳍和野猪头部的结构应用于复合仿生铲设计, 如图 1 所示, 复合仿生铲的装配模型如图 2 所示。

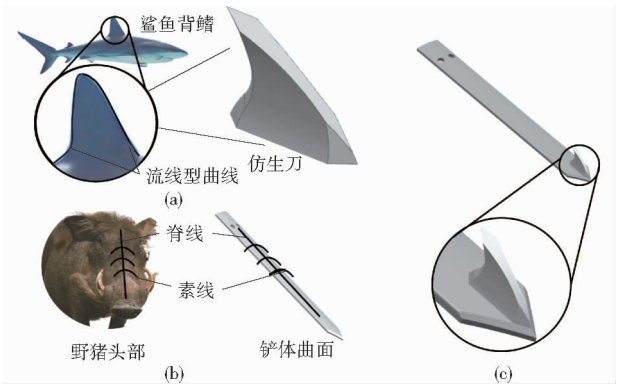


图 1 设计思路

Fig. 1 Design idea

1.2 仿生数据采集

使用三维扫描仪扫描野猪头和鲨鱼背鳍, 获得三维点云数据。将鲨鱼背鳍和野猪头的三维点云数据导入 Geomagic studio。根据软件的默认设置, 单位设置为 mm。点云数据的标准偏差由降噪功能计

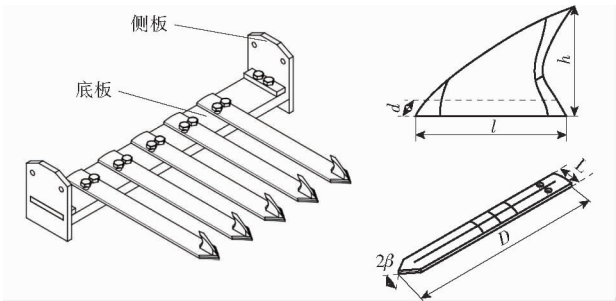


图 2 复合仿生铲装配模型

Fig. 2 Composite bionic shovel assembly model

算得出。使用填充功能填充表面孔洞。使用去除特征和快速平滑功能去除表面不规则凹凸部分。利用砂纸功能对局部不平整的表面进行打磨,最终得到封闭光滑的鲨鱼背鳍和野猪头模型。结合常见根茎类中药材的铲长、铲宽范围作为拟合曲线的范围阈值,将仿生铲片的脊线设定为中心轴线,并以素线所沿的弧形面作为仿生铲铲体结构曲线,使用最小二乘法进行拟合计算,获得仿生铲铲体脊线与素线的拟合方程。

1.3 复合仿生铲结构参数确定

通过研究挖掘铲的工作过程,发现复合仿生铲的铲体及仿生刀的受力符合三面楔受力原理。简化复合仿生铲的三维模型,建立复合仿生铲铲体和仿生刀的简化模型和力学分析模型,如图 3 所示。由图 3a 及三面楔原理分析模型可得

$$\begin{cases} \tan\alpha_1 = \frac{L_{O_1B_1}}{L_{O_1A_1}} \\ \tan\theta_1 = \frac{L_{O_1B_1}}{L_{O_1D_1}} \\ \sin\beta_1 = \frac{L_{O_1C_1}}{L_{A_1C_1}} \end{cases} \quad (1)$$

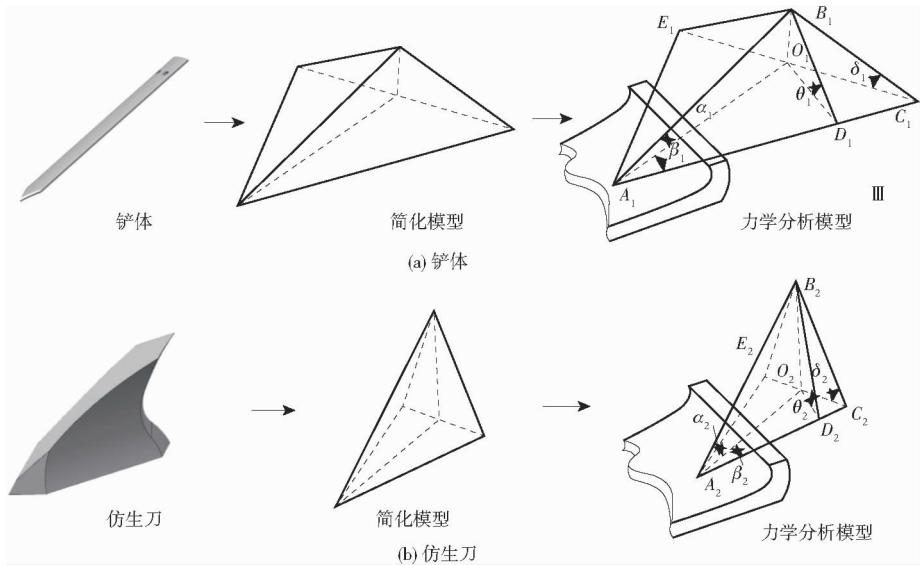


图 3 复合仿生铲铲体和仿生刀的简化模型和力学分析模型

Fig. 3 Simplified model and mechanical analysis model of composite bionic shovel body and bionic blade

$$\begin{cases} \tan\beta_1 = \frac{L_{O_1C_1}}{L_{O_1A_1}} \\ \tan\delta_1 = \frac{L_{O_1B_1}}{L_{O_1C_1}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 α_1 ——复合仿生铲铲体力学分析模型的切土载荷角

β_1 ——铲刃斜角

θ_1 ——切土楔角

δ_1 ——入土角

$L_{O_1B_1}$ ——力学分析模型中从竖直方向垂直平分 C_1E_1 的线段长度

$L_{O_1A_1}$ ——从水平方向垂直平分 C_1E_1 的线段长度

$L_{O_1D_1}$ ——垂直于 A_1C_1 的线段长度

联立式(1)、(2)可得

$$\tan\alpha_1 = \tan\beta_1 \tan\delta_1 \quad (3)$$

同理,由图 3b 得

$$\tan\alpha_2 = \tan\beta_2 \tan\delta_2 \quad (4)$$

综上所述,切土载荷角 α 受切土楔角 θ 和铲刃斜角 β 的共同影响。分析三面楔形对土壤的作用,影响挖掘阻力的因素为切土载荷角 α 、铲刃斜角 β 和入土角 δ ,将其用铲体长度 L 、铲体宽度 D 、铲体高度 H 、仿生刀长度 l 、宽度 d 和高度 h 6 个因素表示。

1.4 结构参数范围计算

挖掘的根本目的是切断根系与土壤之间的粘连,从而将作物翻出土壤。为了克服根系与土壤之间的粘附力,需要建立力学分析模型,以分析挖掘阻力来源。如图 4 所示,在挖掘过程中,根土复合体受到铲面的压缩和拉伸。将复合仿生铲与土壤接触的部分分为土壤压缩区和土壤拉伸区。

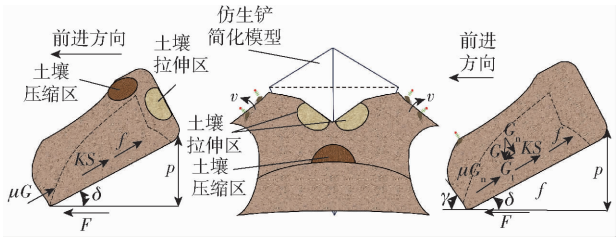


图 4 三面楔原理分析模型

Fig. 4 Analytical model of principle of three-sided wedge

图 4 为复合仿生铲受力分析图,图中 F 为挖掘阻力, G 为挖掘铲上方根土复合体的重力, G_n 、 G_t 分别为复合仿生铲法向载荷、横向载荷, K 为土壤附着力, S 为复合仿生铲工作接触面积, f 为纯切削力, μ 为土壤内摩擦因数。通过对仿生挖掘铲上方的根土复合体水平和垂直方向的受力分析以及对复合仿生铲所受总挖掘阻力分别对 γ 及 δ 求偏导得

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \gamma} = -\frac{(KS+f)(\cos\gamma-\mu\sin\gamma)}{Z(\sin\gamma+\mu\cos\gamma)^2} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \delta} = -\frac{KS(\cos\delta-\mu\sin\delta)}{Z(\sin\delta+\mu\cos\delta)^2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 γ ——前失效面倾角,取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$
 Z ——常数

由式(5)可知,当入土角 δ 和前失效面倾角 γ 为 45° 时,复合仿生铲总挖掘阻力达到最小值。同时为保证铲刃自洁作用,铲刃倾角 β_1 应取 $40^\circ \sim 80^\circ$ 。结合《农业机械设计手册》和常见根茎类中草药挖掘铲铲长、铲宽设计范围,复合仿生铲长度取 $350 \sim 390$ mm,铲宽取 $40 \sim 80$ mm。仿生刀的尺寸根据鲨鱼背鳍三轴尺寸(91.2 mm $\times$ 19.7 mm $\times$ 75.0 mm)等比缩小并取整获得,长度 l 范围为 $28 \sim 32$ mm,宽度 d 范围为 $5 \sim 9$ mm,高度 h 范围为 $23 \sim 27$ mm。综上所述,复合仿生铲的挖掘阻力受上述 6 个因素的影响。

2 三七和土壤物理参数标定

使用 TMS-PRO 型专业食品物性分析仪(力传感器量程为 $0 \sim 2.5$ kN,精度为 0.015% ,数据采集频率为 2 kHz,美国 FTC 公司)、JA5103N 电子分析天平(精度 0.001 g)和游标卡尺(精度 0.02 mm)进行物理参数标定试验。三七样本选自云南省昆明理工大学中药材机械化工程研究中心,选取同一垄中 20 株无病害三七进行参数标定试验。由于三七形状不规则,三七密度采用比重杯法测定,3 次测量取平均值测得三七密度平均值为 $1\,230$ kg/m³。三七土壤的密度使用环刀法测量,3 次测量平均值为 $1\,350$ kg/m³。使用 TMS-PRO 型专业食品特性分析仪对三七和土壤样本进行压缩和剪切试验,确定

三七泊松比为 0.08 ,剪切模量为 4.468×10^7 Pa,土壤泊松比为 0.37 ,剪切模量为 6×10^4 Pa^[23]。

3 仿真试验

3.1 模型建立

三七颗粒模型采用逆向建模方法。三七离散元模型通过三维扫描和点云处理获得。仿真模型的建立和计算由 EDEM 完成。使用 EDEM 颗粒填充功能在三七离散元模型中进行颗粒填充^[24-26]。参数设置如表 1 所示^[27-28]。

表 1 EDEM 土壤颗粒及挖掘部件参数设置
Tab.1 Parameters setting of soil particles and excavation parts

参数	数值
土壤颗粒间静摩擦因数	0.46
土壤颗粒间滚动摩擦因数	0.15
土壤颗粒半径/mm	5.00
65Mn 钢泊松比	0.30
65Mn 钢弹性模量/Pa	1.98×10^{11}
65Mn 钢密度/(kg·m ⁻³)	7 800
土壤颗粒与挖掘部件间碰撞恢复系数	0.59
土壤颗粒与挖掘部件间静摩擦因数	0.57
土壤颗粒与挖掘部件间滚动摩擦因数	0.06

Hertz-Mindlin(no slip)模型在 EDEM 中作为一种基本的接触模型,能够较好地表现出颗粒物料之间的接触效果,根据三七和土壤的物理特性,选用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型建立离散元仿真模型。Hertz-Mindlin(no slip)的法向力分量基于 Hertzian 接触理论,切向力模型基于 Middlin-Deresiewicz 研究结果。法向力和切向力都具有阻尼分量,阻尼系数与恢复系数有关。切向摩擦力遵守库仑摩擦定律,滚动摩擦力通过接触独立定向恒转矩模型表达。

滚动摩擦力对于仿真效果影响显著。在接触表面施加力矩,滚动摩擦力 τ_i 表达式为

$$\tau_i = -\mu_i F_n R_i \omega_i \quad (6)$$

其中
$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

式中 μ_i ——滚动摩擦因数
 F_n ——法向力
 R_i ——质心与接触点之间的距离
 ω_i ——物体在接触点处单位角速度矢量
 E^* ——当量杨氏模量
 R^* ——当量半径
 δ_n ——法向重叠量
将 E^* 、 R^* 定义为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j}$$

(8)

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

(9)

式中 $E_i、E_j$ ——杨氏模量
 $\nu_i、\nu_j$ ——泊松比
 $R_i、R_j$ ——球体接触半径
将阻尼力分解为法向阻尼力和切向阻尼力。
法向阻尼力 F_n^d 表达式为

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \eta \sqrt{S_n m^*} \vec{v}_n^{rel}$$

(10)

其中 $m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}$

(11)

$$\eta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

(12)

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

(13)

式中 m^* ——当量质量
 $m_i、m_j$ ——两个碰撞物体各自质量
 $\vec{v}_n^{rel}$ ——相对速度法向分量
 η ——阻尼系数
 S_n ——法向刚度
 e ——恢复系数

切向力 F_t 取决于切向重叠量 δ_t 和切向刚度 S_t ，
表达式为

$$F_t = -S_t \delta_t$$

(14)

其中 $S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}$

(15)

式中 G^* ——当量剪切模量
 δ_t ——切向重叠量
 S_t ——切向刚度

切向阻尼力 F_t^d 表达式为

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \eta \sqrt{S_t m^*} \vec{v}_t^{rel}$$

(16)

式中 $\vec{v}_t^{rel}$ ——相对速度切向分量

最终构建仿真模型尺寸长度为 1 000 mm，宽度
为 500 mm，高度为 150 mm。

3.2 仿真环境设置

在 EDEM 的 Geometries 中添加颗粒工厂并填充
土壤颗粒。综合考虑土槽参数，避免因填充土壤颗
粒过多，导致仿真计算时间过长^[29]。土槽建立完成
并达到稳定状态后，将挖掘铲模型导入 EDEM 中，
设置挖掘铲入土角为 25°，挖掘深度为 200 mm，对挖
掘铲添加 Linear Translation，速度设置为 0.6 m/s。
设置仿真求解器模块参数，综合考虑计算时间及仿
真稳定性，将固定时间步长设置为 Rayleigh 时间步
长的 20%，根据土壤颗粒填充时间与挖掘作业速

度，设置仿真总时长为 5 s，设置目标保存间隔为
0.01 s^[30]。

3.3 仿真试验设计与分析

3.3.1 结构参数确定

复合仿生铲脊线拟合方程 y_1 和复合仿生铲素
线拟合方程 y_2 的表达式为

$$\begin{cases} y_1 = -0.021\,7x^2 + 7.74 & (R^2 = 0.991\,9) \\ y_2 = 0.094\,1x^2 - 0.014\,7x + 0.635 & (R^2 = 0.994\,5) \end{cases}$$

(17)

以获得减阻效果最显著的工作参数组合为目
的，以不同参数下复合仿生铲的挖掘阻力为试验指
标。结合三七收获机的性能要求和实际作业条件，
仿生刀选取长度 l 、宽度 d 和高度 h 3 个因素，挖掘
铲铲体选取宽度 D 、长度 L 和铲刃斜角 β_1 3 个因素。
使用 $L_{25}(5^6)$ 正交表进行六因素五水平正交试验。
由于没有空列，每组试验重复 3 次以进行方差分析。
其中，仿生刀长度范围为 28 ~ 32 mm，宽度范围
为 5 ~ 9 mm，高度范围为 23 ~ 27 mm。仿生铲铲体宽
度范围为 40 ~ 80 mm，长度范围为 350 ~ 390 mm，
铲刃斜角范围为 40° ~ 80°。有效挖掘阻力的平均
值即为平均挖掘阻力。试验因素水平和仿真试验结
果分别如表 2 和表 3 所示，表 3 中 $A、B、C、D、E、F$
为因素水平值。

表 2 复合仿生铲仿真试验因素水平
Tab.2 Composite bionic shovel simulation test
factors and levels

水平	因素					
	仿生刀	仿生刀	仿生刀	铲体	铲体长	铲刃斜
	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	宽度/mm	度/mm	角/(°)
1	28	5	23	40	350	40
2	29	6	24	50	360	50
3	30	7	25	60	370	60
4	31	8	26	70	380	70
5	32	9	27	80	390	80

为进一步确认各因素对试验指标的影响程度，
对测试结果进行方差分析，方差分析结果如表 4 所
示。从表 4 中可得，以挖掘阻力作为测试指标，因
素 D 对挖掘阻力的影响极显著，而仿生刀的长度、
高度和宽度以及复合仿生铲的铲面长度和铲刃斜
角对挖掘阻力影响均不显著，说明复合仿生铲铲体
宽度是影响挖掘阻力的最主要因素。6 个因素对挖
掘阻力影响程度从高到低进行排序，得： $D > B > F > C > E > A$ 。以挖掘阻力最小为目标，选择最佳工作参数
组合为 $D_1B_2F_1C_3E_5A_2$ 。

3.3.2 响应曲面分析

以对复合仿生铲挖掘阻力影响程度为依据，从

表 3 仿生挖掘铲仿真试验方案与结果

Tab.3 Composite bionic shovel simulation test schemes and results

序号	因素						挖掘阻力/N		
	A	B	C	D	E	F	结果 1	结果 2	结果 3
1	1	1	1	1	1	1	207.25	207.11	207.66
2	1	2	2	2	2	2	234.41	234.45	235.16
3	1	3	3	3	3	3	287.72	288.33	287.66
4	1	4	4	4	4	4	318.91	318.23	318.88
5	1	5	5	5	5	5	317.02	316.99	317.34
6	2	1	2	3	4	5	282.26	282.36	283.13
7	2	2	3	4	5	1	267.57	267.77	267.69
8	2	3	4	5	1	2	318.94	317.65	318.63
9	2	4	5	1	2	3	224.29	224.90	224.00
10	2	5	1	2	3	4	240.39	241.15	239.91
11	3	1	3	5	2	4	307.11	307.95	306.78
12	3	2	4	1	3	5	244.24	245.35	243.96
13	3	3	5	2	4	1	255.04	254.77	255.69
14	3	4	1	3	5	2	257.14	258.02	256.63
15	3	5	2	4	1	3	307.01	306.38	307.32
16	4	1	4	2	5	3	242.18	242.36	241.74
17	4	2	5	3	1	4	263.68	263.29	263.77
18	4	3	1	4	2	5	318.15	317.59	318.54
19	4	4	2	5	3	1	309.03	308.36	309.25
20	4	5	3	1	4	2	216.05	215.76	216.31
21	5	1	5	4	3	2	301.39	300.93	302.02
22	5	2	1	5	4	3	302.78	302.13	303.11
23	5	3	2	1	5	4	244.76	244.32	244.55
24	5	4	3	2	1	5	244.26	243.91	244.36
25	5	5	4	3	2	1	273.45	273.85	273.61

表 4 仿真试验结果方差分析

Tab.4 ANOVA of simulation test results

因素	平方和	自由度	均方	F	P
A	590.628	4	147.657	0.081	0.988
B	4 028.915	4	1 007.229	0.556	0.696
C	2 515.748	4	628.937	0.347	0.845
D	78 882.330	4	19 720.58	10.877	2 × 10 ⁻⁶ **
E	1 256.799	4	314.199 8	0.173	0.951
F	3 371.510	4	842.877 5	0.465	0.761
总和	90 656.140	50	1 813.123		

注：** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。下同。

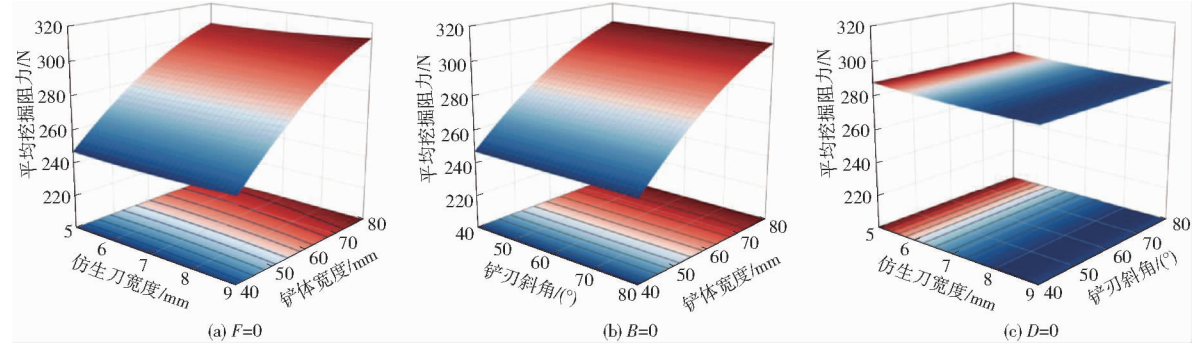


图 5 因素交互作用对挖掘阻力的影响

Fig.5 Effects of factor interactions on digging resistance

高到低依次选取复合仿生铲铲体宽度 D 、仿生刀宽度 B 、铲刀斜角 F 3 个因素,基于 Design-Expert 13 的 Central Composite 进行 25 组试验,得到平均挖掘阻力 Y 的多元二次回归方程为

$$Y = 285.38 - 1.39B - 30.68D - 4.85F + 0.69BD - 0.63BF + 1.23DF + 1.02B^2 - 7.93D^2 - 2.69F^2 \quad (18)$$

由图 5a 可知,平均挖掘阻力随仿生刀宽度增加有微小幅度上升,随铲体宽度增加有显著上升幅度,在两因素接近最大值时响应曲面小幅度向上弯曲,表明此时两因素的交互作用使得平均挖掘阻力有微小增大幅度;由图 5b 可知,平均挖掘阻力随铲体宽度增加显著上升,而铲刀斜角对平均挖掘阻力的影响不明显,响应曲面为规则的弧形曲面,表明两因素交互作用影响不显著;仿生刀宽度和铲刀斜角的响应面为平面,不存在交互作用,如图 5c 所示。综上,平均挖掘阻力最小的复合仿生铲参数组合应在铲体宽度与仿生刀宽度接近最小值的范围内选取,与 3.3.1 节所述结果基本一致。

3.3.3 减阻效果验证

为了得到相对更精确的三维模型,通过三维扫描和点云处理的逆向建模方法获得三七三维模型(图 6)。但在对三维模型进行颗粒填充过程中发现,三七的须根数量众多且交错缠绕,将所有须根都进行颗粒填充难度较大,且填充效果与三七本体相比仍有一定差距;另一方面,考虑到三七模型在此试验中的作用仅为进行轨迹追踪的载体,且在实际挖掘过程中三七形状各异,故不必过分要求与三七原型的相似性,使用简化后的三七模型已能够实现作为轨迹追踪载体的作用,不会影响试验结果的准确性,同时可以缩短 EDEM 计算量和计算时间,因此选择扫描—填充—简化这一步骤。与直接构建简化模型相比,在三七填充模型的基础上进行简化既可以保留三七扫描模型的主要尺寸,也降低了 EDEM 计算量和计算时间。三七模型通过 EDEM 中的颗粒填充功能实现填充,简化后得到三七简化模型

(图 6)。将三七简化模型添加到仿真模型中进行仿真试验(图 7)。



图 6 三七模型填充及其简化过程

Fig. 6 Filling of *Panax notoginseng* model and its simplification process

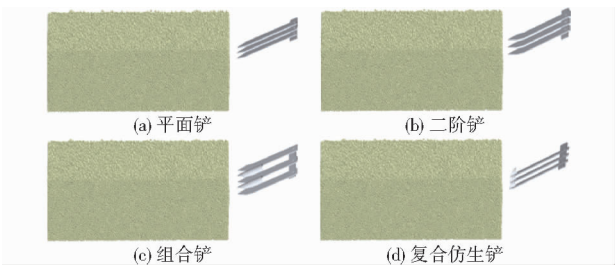


图 7 挖掘仿真模型

Fig. 7 Digging simulation models

图 8 显示了 4 种挖掘铲挖掘过程土壤颗粒速度分析仿真模型。模拟模型中的土壤颗粒速度在 EDEM 后处理部分用 3 种颜色区分,黄色代表最小颗粒速度,红色代表最大颗粒速度,蓝色代表颗粒速度介于最小速度和最大速度之间。

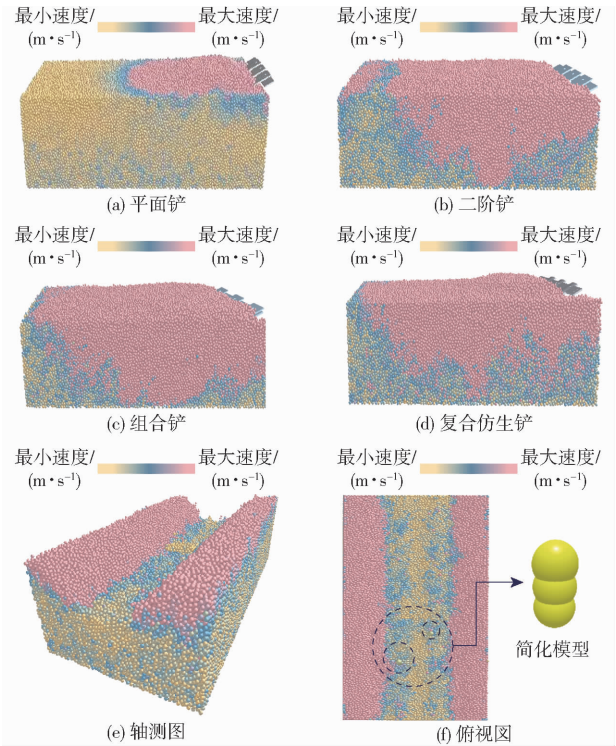


图 8 土壤颗粒速度分析仿真模型

Fig. 8 Simulation model for analysis of soil particle velocity

基于土壤颗粒颜色的分布对 4 种挖掘铲挖掘过程进行直观分析,以红色颗粒的面积大小和位置分布为直观分析标准。对于平面铲,红色颗粒在 X 方

向(台车前进方向)分布较远,且红色颗粒的总面积较小(图 8a)。对于二阶铲,红色颗粒在 Y 方向分布较远,与平面铲相比,红色颗粒在 X 方向上的分布距离和总面积更大(图 8b),这表明二阶铲对土壤扰动的效果优于平面铲。而组合铲和复合仿生铲的红色颗粒在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上分布较远,红色颗粒的总面积更大(图 8c、8d)。由此可见,组合铲和复合仿生铲对土壤的扰动效果优于平面铲和二阶铲。

以上根据红色颗粒的面积大小和位置分布,初步分析了不同挖掘铲结构对土壤的扰动效果。通过图 9、10 对 4 种挖掘铲对土壤颗粒和三七的具体扰动效果进行深入分析,同时对初步分析进行验证。

使用 EDEM 后处理功能对土壤-三七-挖掘铲仿真模型中土壤颗粒和三七颗粒的空间运动轨迹进行跟踪,得到土壤颗粒和三七颗粒的空间运动轨迹图(图 9、10)。以此比较分析 4 种挖掘铲结构对土壤颗粒和三七颗粒的位移和扰动效果。土壤颗粒和三七颗粒的空间运动轨迹图的数据由 EDEM 后处理功能 Analyst 导出。使用 EDEM 的后处理功能和 Origin scatterplot 功能绘制三七颗粒的空间运动轨迹。

在平面铲的作用下,三七颗粒在 XZ 方向的位移效果良好,在 XY 和 YZ 方向的位移有回归的趋势。在二阶铲的作用下,三七颗粒在 YZ 方向上的位移效果良好,在 XY 和 XZ 方向的位移有回归的趋势,且位移方向的变化速度较快。在组合铲作用下,三七颗粒在 XZ 和 YZ 方向的位移效果良好,在 XZ 方向的位移有回位趋势。在复合仿生铲作用下,三七颗粒在 X 、 Y 和 Z 方向的位移效果良好。

以位移的回归趋势和位移方向变化速度快慢作为判断挖掘铲对三七扰动效果的标准。结果表明,复合仿生铲对三七的扰动效果更明显,且位移无回归趋势,更有利于三七从挖掘铲侧前方出土。从图 9 中可以看出,在复合仿生铲作用下,三七颗粒在 X 、 Y 、 Z 3 个方向的位移曲线比较平滑、均匀且位移方向变化不明显,说明复合仿生铲对三七的不规则碰撞较少,有利于保护三七表皮的完整性,降低三七表面损伤率。因此,复合仿生铲对三七的挖掘效果优于其他类型的挖掘铲。

分别对 4 种铲型挖掘铲铲尖入土时首先接触的土壤颗粒进行空间运动轨迹追踪,依此分析土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 3 轴的位移流向。如图 10 所示,当挖掘铲铲尖接触土壤颗粒后,受扰动的土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 方向出现不同程度的位移波动,从而使黏重土壤产生破碎现象;随挖掘铲不断前进,土壤颗粒受到挖掘铲铲面的抬升作用,在 Z 轴方向的位移出现竖直

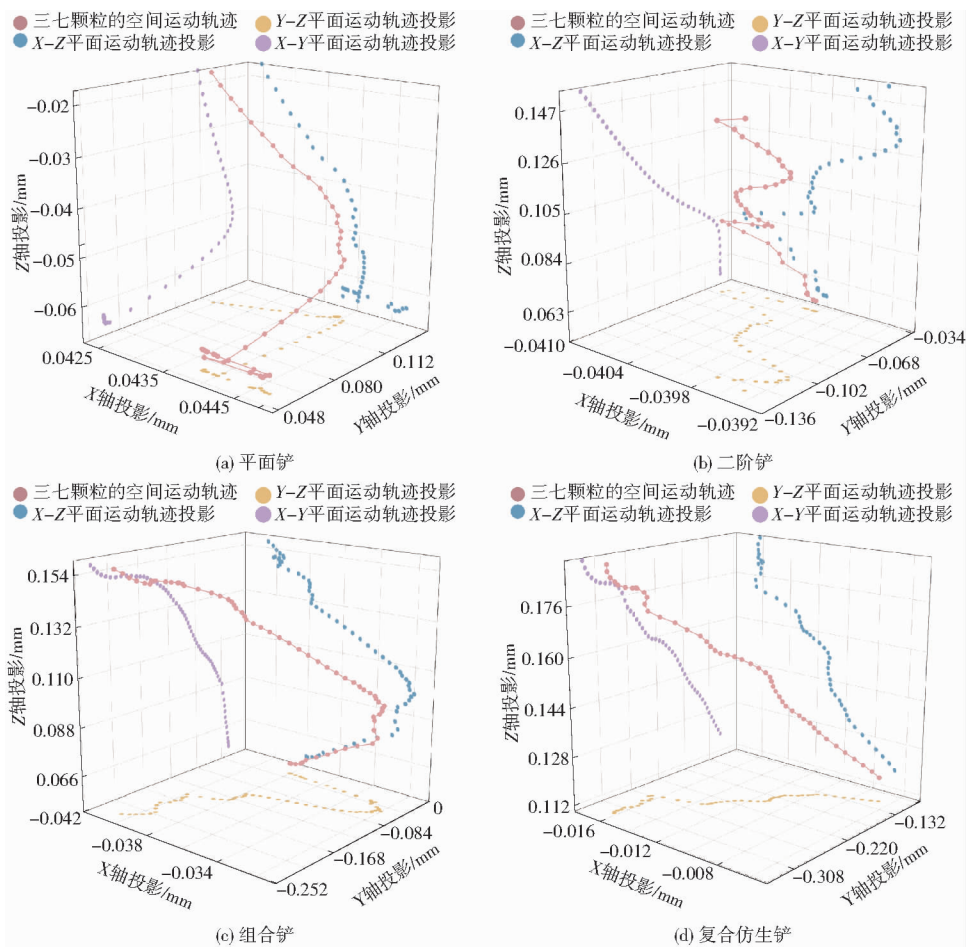


图9 三七颗粒空间运动轨迹图

Fig. 9 Trajectory tracking results figure of *Panax notoginseng* particles

上升随后竖直下降现象。

平面铲运动过程中土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化明显,位移方向变化次数较少;二阶式挖掘铲运动过程中土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化明显,位移方向变化次数少且散点分布较分散;组合式挖掘铲运动过程中土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化明显,在 XZ 方向上位移方向变化次数较多,在 XY 、 YZ 方向上位移变化次数较少;仿生式挖掘铲运动过程中土壤颗粒在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化明显,且在 XY 、 XZ 、 YZ 方向上位移变化次数较多。

以土壤颗粒位移方向和位移方向变化次数作为判断挖掘铲对土壤扰动效果的标准。通过对比分析土壤颗粒空间运动轨迹,4 种挖掘铲在 X 、 Y 、 Z 方向的位移变化都较为明显,因此主要以位移方向变化次数分析土壤扰动效果。结果显示,平面铲对黏重土壤扰动效果及破碎效果一般;二阶铲对黏重土壤扰动效果及破碎效果优于平面铲,但对土壤的连续破碎能力一般;复合仿生铲和组合铲的土壤扰动效果较好,优于平面式挖掘铲和二阶铲。综合各方向位移方向变化次数来看,仿生式挖掘铲的土壤扰动

能力优于组合式挖掘铲。上述结论与图 8 中挖掘铲对土壤颗粒扰动效果的直观分析结果基本一致。

在 EDEM 中,颗粒的轨迹数据以 0.01 s 的频率记录,由于铲尖结构的抬升作用,当铲尖与三七颗粒接触后,会使三七颗粒在 Z 轴方向产生不同幅度的抬升现象,而由于仿生铲铲尖部分安装了仿生刀,在 0.01 s 中对于三七颗粒在 Z 轴方向上的抬升作用更明显,故出现了 Z 轴初始记录值为 0.112,略高于其他种类挖掘铲(−0.06、0.063、0.066)的现象;对于平面铲 Z 轴记录的 −0.06,是由于平面铲铲尖结构平整,在 0.01 s 内对三七颗粒的抬升作用不明显,未超出 Z 轴值为 0 的平面。

仿真试验分析结果表明,土壤颗粒在挖掘铲挤压扰动作用下会产生一定的加速度,使土壤颗粒在仿生刀及铲体的弧形结构周围发生位移,将土壤颗粒沿挖掘铲的运动状态由滑动接触变为可以降低土壤与挖掘铲表面之间附着力和摩擦力的滚动接触,从而提供了良好的土壤流动性。与其他类型的挖掘铲相比,复合仿生铲在三轴方向上能更好地使土壤颗粒产生位移,通过减少铲面携带的土壤颗粒数量,减轻壅土现象来降低挖掘阻力。

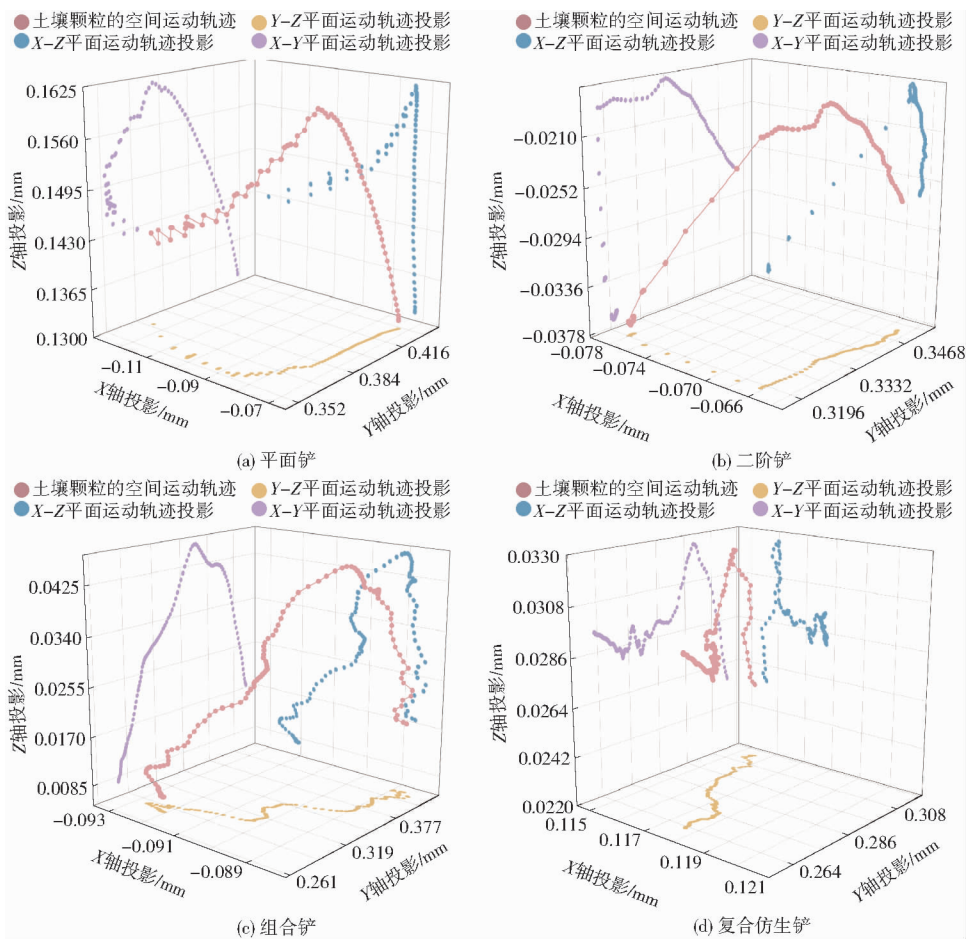


图 10 土壤颗粒空间运动轨迹图

Fig. 10 Trajectory tracking results figure of soil particles

4 现场试验

4.1 现场设施

试验地点选在云南省昆明理工大学中药材机械化工程研究中心,在长 12 m、宽 1.4 m 的土槽试验场地进行现场试验。考虑到土槽台车在启动和停止过程中速度不稳定性会影响有效阻力数据采集,因此将土槽分为台车加速区、有效挖掘阻力采集区和台车减速区 3 部分。每组试验完成后,放下覆土镇压装置平整土壤,如图 11 所示。

复合仿生铲使用 65Mn 钢材料制成,在铲体末端钻孔。底板同样由 65Mn 钢材料制成,并根据设计的铲片中心间距打孔。底板和挖掘铲通过螺丝螺母连接。技术要求采用表面淬火以提高挖掘铲表面的强度和硬度。图 12 分别表示 4 种不同挖掘铲结构参数,具体参数如下:①平面铲的 D 为 60 mm, β_1 为 60° 。②二阶铲的 D 为 60 mm, β_1 为 60° 。③组合铲的破碎铲梁宽 c 为 95 mm, β 为 60° 。④复合仿生铲的 L 为 390 mm, D 为 40 mm, β_1 为 40° , l 为 29 mm, d 为 6 mm, h 为 25 mm。

在对仿生刀进行三维建模时,考虑到仿生刀作



图 11 土槽台车

Fig. 11 Trench cart

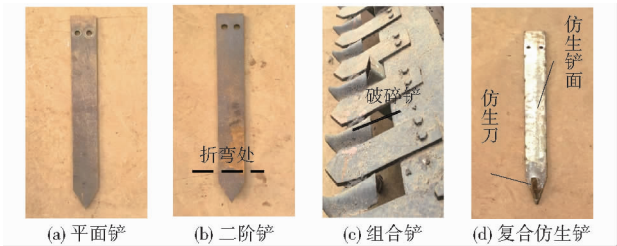


图 12 挖掘铲实物图

Fig. 12 Physical images of digging shovel

为直接接触三七根茎的工作部件,在工作过程中可

能存在损伤三七根茎表皮、割断须根的问题,因此在三维建模过程中选择在不改变符合鲨鱼背鳍三轴尺寸的基础上将仿生刀的刀刃部分进行打磨,如图 1c 所示,在仿生刀实际制作过程中,使用角磨机对刀刃进行打磨,使仿生刀在实际工作中与三七根茎接触部分为弧形平面。

4.2 测试设施

台车配有上位机软件,可显示当前台车行走速度和挖掘铲挖掘阻力等关键工作参数。台车的速度由 MCGS 模拟器中速度信号模块调节。采样频率设置为 1 s。力传感器选择轮辐式拉压力传感器,安装于上拉杆的传感器量程为 0~0.5 t,安装于下拉杆的传感器量程为 0~3 t,灵敏度同为 (2.0 ± 0.05) mV/V,传感器位于杆件中间位置,通过螺纹结构连接,图 11d 为传感器在悬挂杆上的安装位置。通过控制台上的按钮调节悬挂装置的高度,从而调节挖掘深度。台车尾部装有悬挂装置,测试开始前将其降低到指定深度。台车的头部装有覆土镇压装置,在每组测试结束时放下,台车后退将土壤覆平以尽量保证试验因素一致,以便进行下一组试验。

4.3 速度设置

提高机组前进速度可以缩短工作时间,提高三七收获效率。但过快的速度可能会导致数据信号的失真和三七表面的破损。在本试验中,台车的前进速度范围设定为 0.2~0.6 m/s。

4.4 现场试验验证

4.4.1 仿真试验验证

为验证模拟试验的可靠性,对 4 种挖掘铲的实际挖掘效果进行分析。在埋有三七的土槽试验场地,使用 4 种挖掘铲进行了现场试验,挖掘后的结果如图 13 所示(注:X 轴箭头方向为台车的前进方向,Y 轴垂直于台车前进方向,Z 轴垂直于地面,虚线圈内为三七)。对于平面铲,三七的位移方向主要集中在 XY 方向,如 x_a 所示(图 13a)。对于二阶铲,三七的位移主要集中在 YZ 方向,如 y_b 所示(图 13b)。对于组合铲,三七的位移主要集中在 XZ 和 YZ 方向,如 x_c 和 y_c 所示(图 13c)。对于复合仿生铲,如 x_d 和 y_d 所示,复合仿生铲在 X、Y、Z 方向上表现良好,这表明实际挖掘效果与 4 种挖掘铲中三七颗粒的空

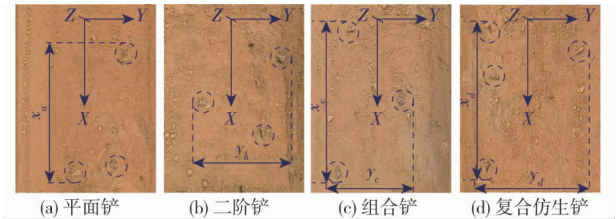


图 13 三七散落位置

Fig. 13 Panax notoginseng scattering location

间运动轨迹基本一致,验证了仿真试验的可靠性和复合仿生铲较好的挖掘效果。

对挖出的三七进行观察,三七表面粘连部分泥土,三七并未出现明显的表皮破损、须根断裂情况,说明仿生刀在降低挖掘阻力的同时,可以保证三七的收获品质;4 种挖掘铲作用下,三七表皮均未出现明显的损伤,破损率较低,能够保证三七的收获品质。

4.4.2 减阻效果验证

根据三七联合收获机的性能要求和实际作业条件,选取入土角、铲片中心间距和行走速度作为试验因素。以挖掘阻力为试验指标,设计三因素五水平正交试验,对 4 种类型的挖掘铲进行了现场试验。

结合三七联合收获机的性能要求,挖掘铲入土角范围为 15°~35°,台车行驶速度范围为 0.2~0.6 m/s,铲片中心间距范围为 50~90 mm。试验设计采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表,试验因素水平表如表 5 所示。土槽场地总长度为 12 m,设定 0~3 m 为台车加速区,3~9 m 为有效挖掘阻力收集区,9~12 m 为台车减速区。为确保试验结果准确性,每组试验重复 3 次取平均值作为最终的有效挖掘阻力(表 6,G、H、I 为因素水平值)。

表 5 现场试验因素水平

Tab.5 Factors and levels for field test

水平	因素		
	入土角/(°)	行驶速度/(m·s ⁻¹)	铲片中心间距/mm
1	35	0.2	90
2	30	0.3	80
3	25	0.4	70
4	20	0.5	60
5	15	0.6	50

方差分析结果如表 7 所示。其中因素 G 对挖掘阻力的影响达到极显著水平,表明入土角是影响挖掘阻力的主要因素。行进速度 H 和铲片中心间距 I 对挖掘阻力的影响不显著。影响复合仿生铲挖掘阻力的因素顺序为 $G>I>H$,工作参数的最优组合为 $G_5I_2H_2$;平面铲工作参数的最优组合为 $G_5H_1I_2$;二阶铲工作参数的最优组合为 $G_5H_1I_3$;组合铲工作参数的最优组合为 $G_5H_3I_3$ 。在最佳工作参数组合下,复合仿生铲的挖掘阻力较小。

为分析复合仿生铲在实际挖掘过程中降低挖掘阻力的具体作用,绘制挖掘铲阻力变化曲线,如图 14 所示。考虑到台车行驶速度对导出数据量的影响,选取行驶速度为 0.2 m/s 的数据进行分析,在此速度下阻力变化相对均匀,更具有参考价值。

从图 14 中可以看出,平面铲在 3 s 左右开始进

表 6 现场试验方案与结果
Tab.6 Field test program and results

序号	因素						平均挖掘阻力/N			
	G	空列			H	I	平面铲	二阶铲	组合铲	复合仿生铲
		1	2	3						
1	1	1	1	1	1	1	1 913.88	1 589.99	1 439.41	977.21
2	1	2	2	2	2	2	1 472.23	1 569.96	1 411.54	703.10
3	1	3	3	3	3	3	1 665.58	1 562.61	1 339.98	745.85
4	1	4	4	4	4	4	1 819.55	1 605.23	1 495.14	940.31
5	1	5	5	5	5	5	2 020.75	1 688.54	1 544.44	1 046.64
6	2	1	2	3	4	5	1 901.46	1 575.65	1 366.60	822.55
7	2	2	3	4	5	1	2 035.79	1 640.03	1 521.30	956.59
8	2	3	4	5	1	2	1 444.15	1 503.03	1 284.22	631.37
9	2	4	5	1	2	3	1 599.25	1 339.33	1 156.28	724.65
10	2	5	1	2	3	4	1 659.32	1 456.23	1 226.32	834.63
11	3	1	3	5	2	4	1 600.11	1 894.55	1 865.01	666.40
12	3	2	4	1	3	5	1 756.14	1 200.36	1 006.33	770.77
13	3	3	5	2	4	1	1 862.12	1 280.86	1 094.61	855.40
14	3	4	1	3	5	2	1 676.98	1 606.38	1 584.88	663.95
15	3	5	2	4	1	3	1 379.48	1 282.62	1 123.36	642.88
16	4	1	4	2	5	3	1 512.14	1 311.24	1 141.20	655.62
17	4	2	5	3	1	4	1 267.61	1 026.58	989.64	645.62
18	4	3	1	4	2	5	1 339.65	1 114.26	999.63	664.24
19	4	4	2	5	3	1	1 455.10	1 179.68	1 025.59	702.99
20	4	5	3	1	4	2	1 628.27	1 137.45	1 023.20	642.64
21	5	1	5	4	3	2	1 116.22	1 087.56	993.36	611.13
22	5	2	1	5	4	3	1 269.24	1 123.36	1 063.21	627.69
23	5	3	2	1	5	4	1 364.08	1 235.48	1 121.21	662.48
24	5	4	3	2	1	5	1 003.24	1 055.22	945.68	542.68
25	5	5	4	3	2	1	1 385.03	945.81	899.63	621.12

表 7 现场试验方差分析
Tab.7 Analysis of variance of field test results

类别	因素	平方和	自由度	均方	F	P
复合仿生铲	G	228 352.487	4	57 088.122	5.767	<0.01 **
	H	56 917.983	4	14 229.246	1.437	0.281
	I	96 674.014	4	24 168.504	2.441	0.104
	总和	39 599.673	12	9 899.918		
平面铲	G	1 047 734.195	4	261 933.549	25.892	<0.01 **
	H	385 219.093	4	96 304.773	9.520	<0.01 **
	I	226 408.338	4	56 602.084	5.595	<0.01 **
	总和	121 397.814	12	10 116.485		
二阶铲	G	1 019 519.247	4	254 879.812	10.217	<0.01 **
	H	138 079.071	4	34 519.768	1.384	0.297
	I	54 534.557	4	13 633.639	0.547	0.705
	总和	299 366.224	12	24 947.185		
组合铲	G	763 356.137	4	190 839.034	5.991	<0.01 **
	H	214 468.779	4	53 617.195	1.683	0.218
	I	107 439.206	4	26 859.802	0.843	0.524
	总和	382 225.967	12	31 852.164		

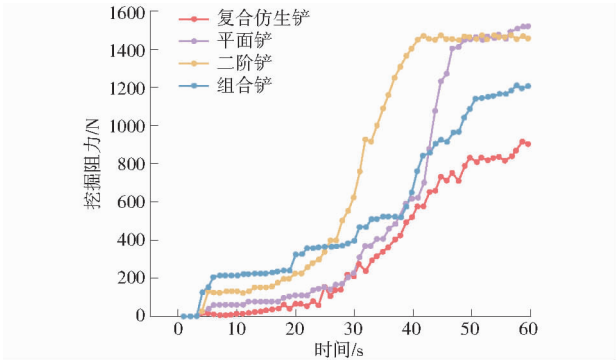


图 14 挖掘阻力变化曲线
Fig. 14 Variation curves of digging shovel resistance

升到 1 500 N,在 32、44、46 s 时有小幅下降,46 s 达到峰值后趋于平稳。复合仿生铲在大约 3 s 时开始进入土壤,挖掘阻力呈阶梯式上升,其中在 44 s 时有小幅下降,50 s 后呈缓慢上升趋势。其中,18、23、44、50、51、56、59 s 时有小幅下降,25、31、46 s 时有明显下降,50 s 后呈缓慢上升趋势。

对以上现象进行对比分析发现,铲体结构的作用对挖掘阻力的影响较为明显。对于平面式挖掘铲和二阶式挖掘铲,两者共同点为铲体结构都为平面,不同点为二阶式挖掘铲存在二阶折弯处,对于黏性土壤有一定的抬升破碎作用,有利于减轻土壤堆积现象,因此与平面式挖掘铲相比二阶式挖掘铲阻力更小。对于组合式挖掘铲和复合仿生挖掘铲,两者共同点为都带有土壤破碎装置。组合式挖掘铲带有土壤破碎铲,复合仿生挖掘铲带有仿生刀。土壤破碎装置对土壤的破碎效果优于二阶式挖掘铲,因此组合式挖掘铲和复合仿生挖掘铲的减阻效果优于前两者。对复合仿生挖掘铲的挖掘阻力曲线深入分析。在曲线中出现的 6 次小幅度下降及 3 次明显幅度下降,主要有 2 个原因:①土壤经过仿生刀片破碎后结构更加松散,黏附能力下降。②复合仿生挖掘铲的铲面结构使部分土壤从土壤堆积处脱出,减少了铲体承载的土壤颗粒数量。这使复合仿生挖掘铲达到了更好的减阻效果。

对挖掘阻力趋于平稳后的数据取平均值,得到平面铲、二阶铲、组合铲和复合仿生铲的平均挖掘阻力分别为 1 465.24、1 360.48、1 226.47、1 094.51 N,复合仿生铲的平均挖掘阻力较平面铲、二阶铲、组合铲降低了 25.30%、19.55%、10.76%。这表明,结合鲨鱼背鳍和野猪头的复合仿生方法能更好地减少挖掘阻力。

5 结论

(1)为减少三七的挖掘阻力,提出了一种新型复合仿生铲。通过理论分析确定了影响复合仿生铲

入土壤,挖掘阻力开始缓慢上升。二阶铲在约 4 s 时开始入土,挖掘阻力在 27 s 前缓慢上升,50 s 后上

挖掘阻力的因素。结合影响复合仿生铲挖掘阻力的因素,使用 Hertz – Mindlin (no-slip) 模型,通过正交试验方法进行仿真试验,得出阻力最小的复合仿生铲结构参数。利用复合仿生铲结构参数建立三维模型并使用 65Mn 钢进行制作。在模型中跟踪颗粒的位移流,以评估三七的挖掘效果。仿真试验结果通过现场试验进行验证。通过设计正交试验进行实地测试,确定了复合仿生铲最佳工作参数组合。

(2)复合仿生铲的结构参数确定为:仿生刀长 29 mm、宽 6 mm、高 25 mm,仿生铲铲体长 390 mm、宽 40 mm、铲刃斜角 40°。

(3)通过现场试验结果的方差分析发现,影响复合仿生铲挖掘阻力的主要因素是入土角。最佳工作参数组合为入土角 15°、挖掘速度 0.3 m/s、铲片中心间距 80 mm。

(4)复合仿生铲的平均挖掘阻力为 1 094.51 N,相对平面铲 1 465.24 N 降低了 25.30%;相对二阶铲 1 360.48 N 降低了 19.55%;相对组合铲 1 226.47 N 降低了 10.76%。这表明复合仿生方法在挖掘铲结构上的应用是可行的,破土能力和脱附能力相结合的复合仿生结构对降低挖掘阻力有显著效果。

参 考 文 献

[1] WANG Ting, GUO Rixin, ZHOU Guohong, et al. Traditional uses, botany, phytochemistry, pharmacology and toxicology of *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen; a review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 188: 234 – 258.

[2] 赵菲菲. 牵引式三七收获机的设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

ZHAO Feifei. The tractive *Notoginseng* harvester design and experimental research[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[3] 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)

[4] ZHAO Jiale, LU Yun, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of bionic stubble breaking-deep loosening combined tillage machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(4): 123 – 134.

[5] ZHANG Dongguang, CHEN Yuxiang, MA Yunhai, et al. Earthworm epidermal mucus: rheological behavior reveals drag-reducing characteristics in soil[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 57 – 66.

[6] YAN Guoqi, TIAN Peng, MO Jiasi, et al. Low-velocity resistance distortion and bionic drag reduction for ship-type paddy field machinery[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 7 – 14.

[7] GUAN Chunsong, FU Jingjing, XU Lei, et al. Study on the reduction of soil adhesion and tillage force of bionic cutter teeth in secondary soil crushing[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 133 – 147.

[8] SONG Wei, JIANG Xiaohu, LI Lekai, et al. Increasing the width of disturbance of ploughpan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105356.

[9] SUN Jianfeng, CHEN Huaming, WANG Zaiman, 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.

[10] ZHANG Fubin, LUO Zhitao, ZHENG Enlai, et al. Imitating pangolin scale structure for reducing adhesion and resistance of rotary tillage in wet-adhesive soil[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 245: 106306.

[11] LI Junwei, LI Xiangyu, HU Bin, et al. Analysis of the resistance reduction mechanism of potato bionic digging shovels in clay and heavy soil conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108315.

[12] LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Biomimetic functional surface of reducing soil adhesion on 65Mn steel[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(12): 1687814019889801.

[13] REN Luquan, HAN Zhiwu, LI Jianqiao, et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1–2): 1 – 12.

[14] 刘梦飞, 周伟, 李西兴. 三七土壤参数测定及挖掘铲优化研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 165 – 172.

LIU Mengfei, ZHOU Wei, LI Xixing. Determination of soil parameters of *Panax notoginseng* and optimization of digging shovel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 165 – 172. (in Chinese)

[15] AWUAH E, ZHOU Jun, LIANG Zian, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of Jerusalem artichoke vibrating digging shovel using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105344.

[16] BU Peng, LI Yanlong, ZHANG Xin, et al. A calibration method of discrete element contact model parameters for bulk materials based on experimental design method[J]. Powder Technology, 2023, 425: 118596.

[17] HELLE R H, LEMU H G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 5255 – 5262.

[18] JAVAIID M, HALEEM A, SINGH R P, et al. Industrial perspectives of 3D scanning: features, roles and it's analytical

applications[J]. Sensors International, 2021, 2: 100114.

[19] SANCHEZ C, ARRIBART H, GIRAUD GUILLE M M. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems[J]. Nature Materials, 2005, 4(4): 277 – 288.

[20] AIZENBERG J, FRATZL P. Biological and biomimetic materials[J]. Advanced Materials, 2009, 21(4): 387 – 388.

[21] 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)

[22] XU Liang, LIN Minxu, LI Jianqiao. Three-dimensional geometrical modelling of wild boar head by reverse engineering technology[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(1): 85 – 90.

[23] 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)

[24] HORABIK J, MOLEND A. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206 – 225.

[25] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 220 – 227.

[26] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298 – 306.

[27] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1 – 2): 227 – 242.

[28] XIE Kaiting, ZHANG Zhaoguo, WANG Fa'an, et al. Mathematical model construction and verification of soil and *Panax notoginseng* root adhesion[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022, 38: 131 – 141.

[29] 侯加林,张二鹏,张康博,等. 基于 DEM – MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(12):46 – 57,87.
HOU Jialin, ZHANG Erpeng, ZHANG Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM – MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 46 – 57,87. (in Chinese)

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