doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.05.011

基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验

张兆国[1,2]　薛浩田[1,2]　王一驰[1,2]　解开婷[1,2]　邓寓轩[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:为减小三七收获过程中的挖掘阻力,以三七根茎及种植土壤为研究对象,测定本征物理参数,设置 Bonding 键参数建立三七根茎的离散元模型,分析根土粘结机理,利用 Hertz－Mindlin with JKR 建立三七根茎-种植土壤离散元复合模型;建立并分析挖掘铲的理论力学模型,确定仿生挖掘铲设计尺寸(长×宽×厚)为:360 mm×150 mm×8 mm、入土角 30°、铲尖半角 60°;采集野猪头三维模型的点云数据,确定仿生铲的结构曲线方程,建立仿生挖掘铲的三维模型;开展仿生挖掘铲与平面挖掘铲的仿真对比试验,追踪颗粒位移流向得平均位移以及平均挖掘阻力,分析颗粒的速度矢量明晰了挖掘铲面的减阻机理,得仿生挖掘铲的仿真试验减阻率为 19.15%;利用高速摄影和阻力采集设备开展土槽试验,结果表明土壤颗粒流向与仿真趋势一致,仿生挖掘铲和平面挖掘铲的平均挖掘阻力为 1 207.23、1 594.49 N,仿生挖掘铲减阻率为 24.29%,与仿真试验减阻率十分接近,验证了离散元模型准确可靠、挖掘铲力学模型构建准确,仿生结构设计合理。

关键词:三七根茎;仿生挖掘铲;离散元法;挖掘机理

中图分类号:S225.7+9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)05-0100-12　　**OSID**:

Design and Experiment of *Panax notoginseng* Bionic Excavating Shovel Based on EDEM

ZHANG Zhaoguo[1,2]　XUE Haotian[1,2]　WANG Yichi[1,2]　XIE Kaiting[1,2]　DENG Yuxuan[1,2]

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

Abstract: In order to reduce the digging resistance during *Panax notoginseng* harvesting, the roots and planting soil of *Panax notoginseng* were taken as the research object, the intrinsic physical parameters were measured, Bonding parameters were set to establish the discrete element model of roots and stems of *Panax notoginseng*, and the root and soil bonding mechanism was analyzed. The Hertz－Mindlin with JKR was used to establish the discrete element composite model of roots and stems and planting soil of *Panax notoginseng*. The theoretical mechanical model of the digging shovel was established and analyzed, and the design model size of the bionic digging shovel was determined as follows: 360 mm×150 mm×8 mm, entry angle of 30°, half angle of the shovel tip of 60°. The point cloud data of the three-dimensional boar head model were collected, the structural curve equation of the bionic shovel was determined, and the three-dimensional model of the bionic excavator shovel was established. The simulation comparison test of bionic excavator shovel and plane excavator shovel was carried out, the average displacement and average excavation resistance were obtained by tracking the particle displacement flow direction, and the drag reduction mechanism of excavation shovel surface was defined by analyzing the particle velocity vector. The drag reduction rate of the bionic excavator was 19.15% in the simulation test. The soil groove test was carried out with high-speed photography equipment and resistance acquisition equipment. The results showed that the flow direction of soil particles was consistent with the simulation trend. The average digging resistance of the bionic excavator and the surface excavator was 1 207.23 N and 1 594.49 N, and the drag reduction rate of the bionic excavator was 24.29%, which was very close to the drag reduction rate of the simulation test. It was verified that the discrete element model was accurate and reliable, the mechanical model of excavation shovel was constructed accurately, and the bionic structure design was reasonable.

Key words: *Panax notoginseng* rhizome; bionic digging shovel; discrete element method; mining mechanism

收稿日期:2021－05－26　修回日期:2021－06－20

基金项目:国家自然科学基金项目(51865023)、云南省重大科技专项(2016ZF001)和云南省高校工程研究中心建设计划项目

作者简介:张兆国(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:zzg@kust.edu.cn

0　引言

机械化采挖三七能减轻人工劳动强度提高收获效率，目前三七采挖对机械化水平提出更高要求，需对采挖过程中的机理进行研究和揭示，在提高收获效率的同时减少挖掘阻力；而利用仿生设计以及离散元法的优化设计技术已是现代农业机械研究的重要前沿和热点[1]；通过离散元法（EDEM）可建立相似性高的仿真模型，模拟现实作业、剖析挖掘过程机理，分析挖掘阻力的来源，从而验证仿生装置设计的优良性和合理性。

国内外利用仿生设计和离散元法在物料参数标定、工作机理研究、装置联合仿真等方面做了大量研究。肖茂华等[2]提取蝼蛄爪趾的边缘曲线设计了仿生旋耕刀，建立土壤离散元模型对比联合仿真试验，验证了离散元模型的准确性；LI 等[3]将穿山甲鳞片表面结构应用于马铃薯挖掘铲铲面，利用离散元法建立聚合的粘性土壤，对比平面铲得仿生铲铲面的减阻性更优；赵淑红等[4]研究玉米秸秆物料特性以及深松铲滑切原理，建立离散元分层土壤设计了交互式分层深松铲，分析土壤颗粒的速度矢量方向，验证了分层深松铲减阻性优于其他铲形；田昆鹏等[5]提取天牛上颚切割齿的轮廓曲线，设计了大麻茎秆仿生切割刀片，进行切割对比试验后表明仿生刀片切入力强、割茬口齐平、切割质量高；樊昱[6]构建马铃薯的根系团聚体离散元模型，对比不同铲形仿真试验和土槽试验的工作阻力，验证离散元模型的准确性和可靠性，并分析团聚体分离时的动态，揭示挖掘过程的土壤相互作用。由以上文献可知，目前三七根土离散元模型的构建处于空白阶段，也尚未开展有关三七挖掘机理的分析；上述文献中未分析仿生装置挖掘时，铲面结构对于根土颗粒位移流向的影响；因此设计仿生挖掘铲达到减阻效果具有现实意义。

综上，本文借鉴文献中的离散元法和仿生手段，以三七根茎以及种植土壤作为研究对象，测定物料的物理本征参数，采用逆向工程手段建立根土离散元复合模型；根据野猪翻土的动物特性，利用三维扫描采集野猪头部的点云数据，进行仿生挖掘铲的理论力学分析和设计；通过仿真和土槽对比试验，剖析三七挖掘机理，验证仿生挖掘铲的减阻性以及理论力学模型的可行性。

1　三七根茎-种植土壤离散元模型

三七种植农艺要求为垄作，植株行距 100 mm、间距 150 mm，如图 1 所示；待采挖的三七根系深入土壤且十分发达，种植深度根据海拔气候的差异在 150 ~ 260 mm 之间[7]，种植深度决定了挖掘铲的入土深度，且越深土壤间粘结作用越大，挖掘铲铲面的承载以及前进阻力也会增加，这是挖掘阻力的来源之一[8]；故测定三七根茎、种植土壤等基本物理参数，对于分析根土结合、根土间相互作用、离散元模型的建立都有直接影响。



图 1　三七种植大棚

Fig. 1　*Panax notoginseng* planting greenhouse

1.1　三七根茎及种植土壤物理参数测定

1.1.1　三七根茎的物理参数测定

三七根茎及种植土壤样本取自云南省丘北县，选同一垄中部面积 1 m^2 内无病害共 26 株三七根茎，考虑到三七根茎外形不规则，故利用 DIN ISO 11465—1996《土壤质量　土壤生物的干物质和水含量的测定　重量法》中的比重杯法测量根茎密度，得三七根茎密度平均值为 1.01 g/cm^3，密度测定装置及试验数据如图 2 所示。

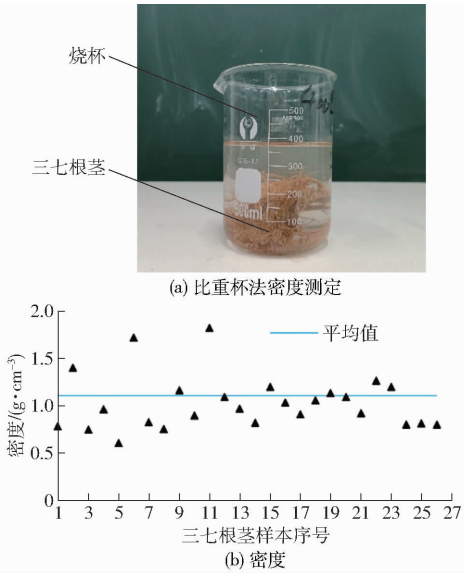


图 2　三七根茎密度测定结果

Fig. 2　Determination of rhizome density of *Panax notoginseng*

1.1.2　种植土壤的物理参数测定

由于种植土壤是离散元化的形式，建立土壤离散元模型时，只考虑土壤颗粒的半径、分级颗粒大小、选定颗粒形状进行组合。为消除土壤采样的差异，试验在面积 1 m^2 内依据国标五点采样法进行取样，根据三七种植农艺要求，取样深度在 150 ~

260 mm 之间,每个样本为(1 000 ± 10)g,利用 4 级泰勒筛开展共 110 组土壤粒径构成试验[9],取均值得 0 ~ 1 mm 颗粒占比 34.95%、1 ~ 2 mm 颗粒占比 21.45%、2 ~ 5 mm 颗粒占比 22.15%、5 mm 以上颗粒占比 21.45%。样本筛分后如图 3 所示。

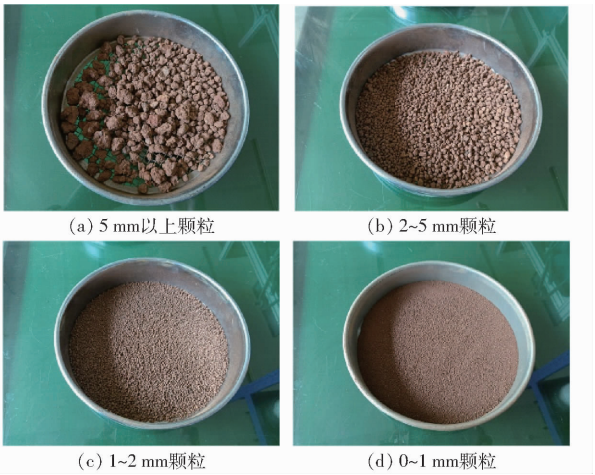


图 3 种植土壤泰勒筛筛分结果

Fig. 3 Taylor sieve for planting soil

含水率对土壤间的粘结力有直接作用,水分在土壤颗粒间产生毛细作用的拉力,且含水率影响土壤结合的类型,为后续离散元复合模型的选择提供理论依据与参考[10]。考虑三七种植的农艺深度,对同一垄作的种植土壤,分别测定深度 50、100、150、200 mm 的平均含水率为 5.24%、10.88%、16.71%、24.12%(图 4)。

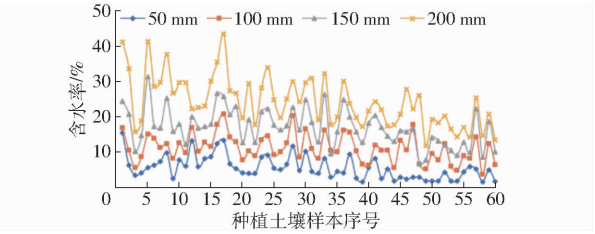


图 4 不同深度土壤含水率

Fig. 4 Soil moisture content at different depths

1.2 三七根茎及种植土壤的离散元模型

在离散元仿真试验中,为保证仿真试验结果准确有效,建立准确可靠的离散元模型,故对三七根茎及种植土壤的物理本征参数进行确定,通过剪切和拉伸试验以及查阅相关参数标定文献,确定根土的物理本征参数,如表 1 所示。

1.2.1 三七根茎离散元模型

逆向工程是根据已有实物进行模型重构,通过三维扫描仪测量物体点云数据,生成数字化模型,然后进行修改、优化、再设计的过程[15-16]。三七根茎受多种因素影响,生长成熟后呈现不规则形状,主要由主根和支根构成,如图 5 所示,且支根绵密细长和土壤缠绕,难以用逆向工程提取特征,故为降低三维扫描建模难度,扫描时暂时忽略支根。参照文献[17-19]中逆向建模的方法,利用三维扫描建模能有效提取三七根茎的外形尺寸轮廓,减少建模难度和周期,快速扫描和测量目标物体的细节,准确解译目标物体的三维信息,使模型更加接近实际,一定程度上能消除仿真试验的误差,也为建立离散元模型做好前期准备。

表 1 根茎与土壤本征物理参数

Tab. 1 Rhizome and soil intrinsic physical parameters

参数	数值
三七根茎泊松比 μ_1	0.335[11]
三七根茎剪切模量/Pa	5.135×10^6[12]
三七根茎密度/(g·cm^{-3})	1.01
土壤泊松比 μ_2	0.410[13]
土壤剪切模量/Pa	1.61×10^6[14]
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 330



图 5 三七根茎结构

Fig. 5 Rhizome structure of *Panax notoginseng*

选取云南省丘北县三七样本,为降低三维扫描建模难度,扫描前先剪去支根,将定位贴纸粘贴主根周围进行尺寸定位识别,确保尺寸、形状、轮廓和实际基本一致;确定扫描采集区域大小,扫描完样本一侧后,翻转 180°再次扫描采集根茎正反表面的点云数据,利用正反两面翻转扣合的方式进行模型构建,通过后处理降噪修剪得出三七根茎的三维模型,扫描过程如图 6 所示。

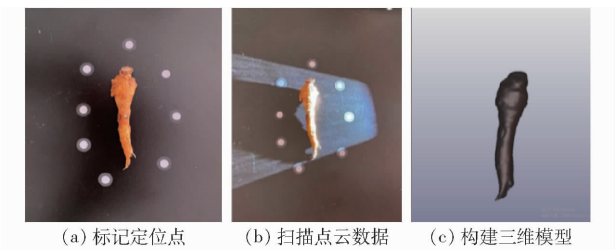


图 6 根茎三维扫描建模过程

Fig. 6 Rhizome 3D scanning modeling process

三七主根建模完成后,考虑支根与种植土壤的缠绕影响,利用 SolidWorks 曲线扫描命令进行支根建模;因为采挖时三七的损伤表现为破皮、断裂,要求离散元模型模拟根茎内部结构的连接以及凸显损伤情况,所以选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型进行颗粒填充,参考根茎类物料的设置[20-21]得

Bonding 键参数如表 2 所示；试验测得三七根茎三轴平均尺寸为 131.56 mm × 142 mm × 105.56 mm、主根平均直径为 24.91 mm；兼顾仿真效率和周期，对三七主根、支根分别设置半径 1 mm 和 0.25 mm 共计 9 647 个颗粒进行填充，得三七根茎离散元模型如图 7 所示。

表 2　三七 Bonding 键参数设置

Tab. 2　Bonding key parameter setting of *Panax notoginseng*

参数	数值
法向刚度/(N·m^{-1})	9.60×10^6
切向刚度/(N·m^{-1})	6.80×10^6
临界法向应力/Pa	8.72×10^6
临界切向应力/Pa	7.50×10^6
粘结半径/mm	1.50

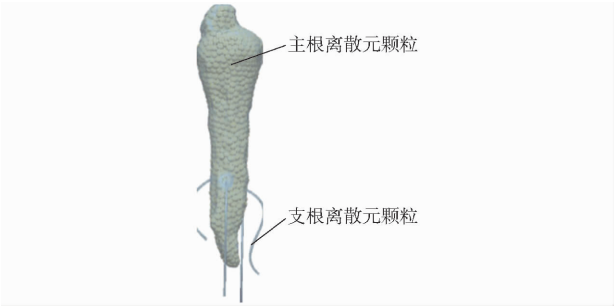


图 7　三七离散元模型

Fig. 7　Discrete element model of *Panax notoginseng*

1.2.2　种植土壤的离散元模型

在建立种植土壤的离散元模型时，考虑到土壤自然状态下就是离散化的颗粒，所以仅选择离散元颗粒的半径和颗粒类型，使离散元模型及试验结果贴合实际。利用四级泰勒筛进行筛分后，观察可知 5 mm 以上的土壤颗粒呈现不规则形状，故选用四球组合形式的颗粒，颗粒总长为 5.3 mm、半径1.5 mm；2 ~ 5 mm、1 ~ 2 mm、0 ~ 1 mm 的土壤颗粒是类圆球形，故选择圆球形颗粒类型，颗粒半径分别为 1.5、0.75、0.4 mm。颗粒类型及半径尺寸如图 8 所示。

1.3　三七根茎-种植土壤的离散元复合模型

三七根茎和种植土壤产生粘结，主要是支根与土壤的结合，紧密程度取决于支根的繁茂；土壤和根茎表皮的粘结，取决于含水率的大小；再者是土壤间水分子的架构也造成粘附[22]。表面粘连或粘附体现在颗粒表面间的分子结合力（范德华力）、电磁力等。粘连模型受力规律符合 JKR 理论，其法向接触力由 Hertz 理论的无粘连力和粘连表面能组成；切向接触力来源于颗粒间的滑移、剥离的影响。而赋予适当的粘连表面能，并给定一定的运动加速度，即可使颗粒凝聚形成结块[23]。根据土壤的粘附特性，最终选择 Hertz - Mindlin with JKR 为三七根茎和种植土壤的离散元复合模型，JKR 粘结参数可代表根土之间粘结力。根茎和土壤、土壤和土壤间的 JKR 粘结参数，可通过文献和参数标定仿真试验得出，如表 3 所示。

根据三七垄作种植农艺，为提高仿真效率节约时间，模拟种植垄体农艺要求，设仿真求解区垄体三维尺寸（垄宽 × 垄高 × 垄长）为 1 500 mm × 300 mm × 1 000 mm，选择 Dynamic 生成方式；三七根茎按标准种植行间距 150 mm × 200 mm 垂直下落到土壤中，数量共 3 株；土壤颗粒总数量为 120 000 个，土壤颗粒数目按测定百分比分别为 41 940、25 740、26 580、24 740 个。根土离散元复合模型如图 9 所示。

2　挖掘铲力学分析

2.1　挖掘三面楔原理分析

三七挖掘过程中，阻力受挖掘铲几何形状、挖掘

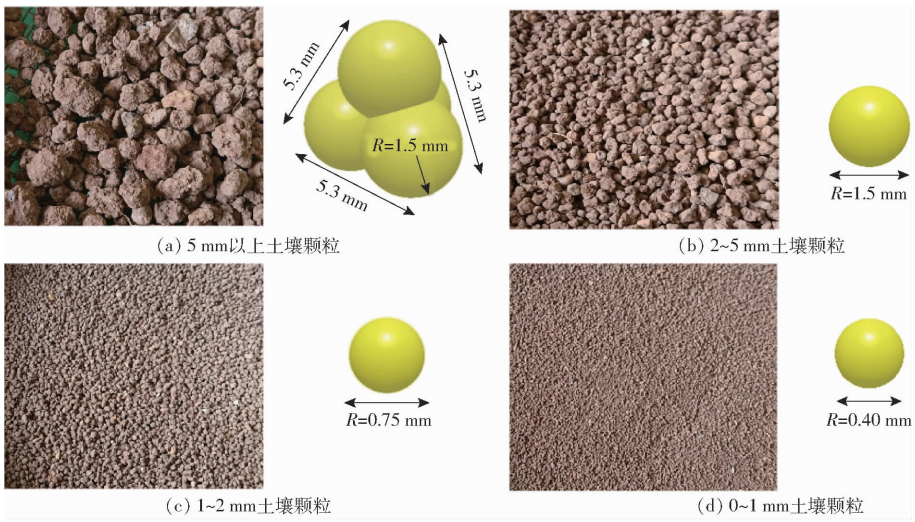


图 8　种植土壤离散元模型

Fig. 8　Discrete element model for planting soil

表 3 JKR 表面粘结接触参数

Tab. 3 JKR surface bonding contact parameters

参数	根茎-土壤	土壤-土壤
法向刚度/(N·m^{-1})	3.54×10^{6}	9.60×10^{6}
切向刚度/(N·m^{-1})	3.54×10^{6}	9.60×10^{6}[10]
临界法向应力/Pa	2.70×10^{6}	8.72×10^{6}
临界切向应力/Pa	2.70×10^{6}	8.72×10^{6}[12]
JKR 表面能/(J·m^{-2})	5.34	14.52[14]
JKR 粘结半径/mm	1.5	1.5
碰撞恢复系数	0.36	0.73
静摩擦因数	0.45	0.98
滚动摩擦因数	0.12	0.16

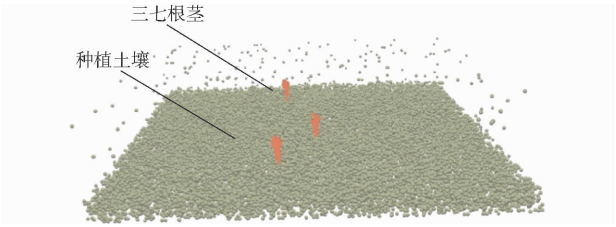


图 9 三七根茎-种植土壤离散元复合模型

Fig. 9 Discrete element composite model of rhizome and planting soil of *Panax notoginseng*

深度、挖掘铲入土角度的共同影响,收获过程中 60% ~73% 的功率消耗于挖掘阻力[24];分析发现挖掘铲结构符合三面楔受力原理[25],对挖掘铲三维模型进行简化,建立挖掘铲的力学模型如图 10 所示。

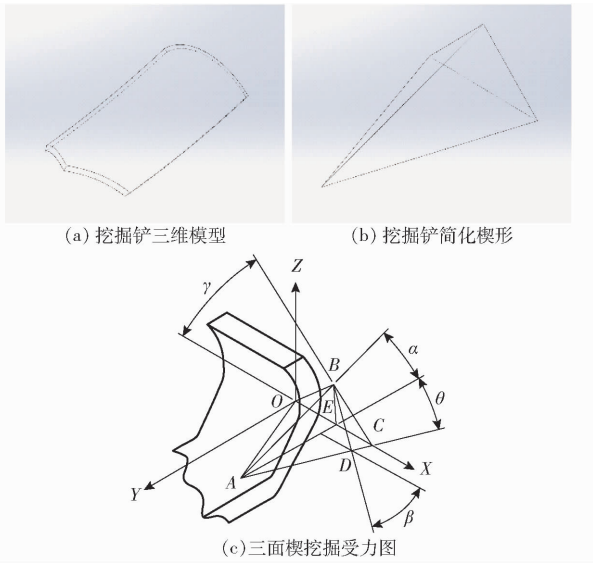
据图 10c 三面楔挖掘受力关系得出各楔角关系式

$$\begin{cases}\tan\alpha=\dfrac{l_{BE}}{l_{AE}}\\ \tan\beta=\dfrac{l_{BE}}{l_{ED}}\\ \sin\theta=\dfrac{l_{ED}}{l_{AE}}\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}\tan\theta=\dfrac{l_{CE}}{l_{AE}}\\ \tan\gamma=\dfrac{l_{BE}}{l_{CE}}\end{cases}\tag{2}$$

联立式(1)、(2)计算得

$$\tan\alpha=\tan\beta\tan\theta\tag{3}$$



(a) 挖掘铲三维模型 (b) 挖掘铲简化楔形 (c)三面楔挖掘受力图

图 10 挖掘铲三面楔原理分析

Fig. 10 Principle analysis of excavating shovel wedge

式中 α——切土载荷角,(°)

β——切土楔角,(°)

θ——铲面斜角,(°)

γ——入土角,(°)

可知切土载荷角 α 直接受切土楔角 β 和铲面斜角 θ 影响,根据三面楔对土壤的作用,影响挖掘阻力的因素为切土载荷角 α、铲面斜角 θ、入土角 γ。

2.2 挖掘铲铲面受力分析

土壤的破碎程度取决于挖掘铲铲面结构、根土复合体的内部结合、土壤受力后的位移流向等;挖掘过程中根土复合体沿铲面滑移产生挤压或拉伸;受土壤含水率影响,土壤对挖掘铲铲面形成粘附力和摩擦力。而挖掘的目的就是克服根土的粘结,促使根茎和土壤相对运动,粘结键间产生分离断裂破碎。因此建立挖掘铲面的力学模型,分析挖掘阻力来源,如图 11 所示。

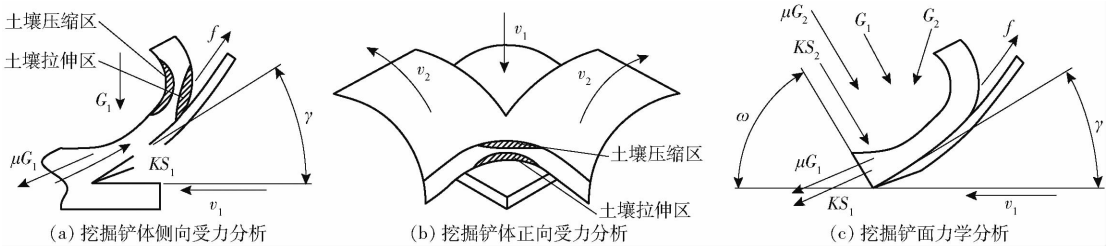
据图 11a 得挖掘铲体侧向力学平衡方程式

$$F_1=G_1\sin\gamma+(\mu G_1+KS_1+fl)\cos\gamma\tag{4}$$

$$G_1\cos\omega-G_2\cos\gamma+(\mu_1G_1+KS_1+fl)\cos\gamma+KS_1\cos\omega-\mu G_1\cos\omega=0\tag{5}$$

$$G_1\sin\omega-G_2\sin\gamma+(\mu_1G_1+KS_1+fl)\sin\gamma+KS_1\sin\omega-\mu G_1\sin\omega=0\tag{6}$$

联立方程(4) ~(6)得



(a) 挖掘铲体侧向受力分析 (b) 挖掘铲体正向受力分析 (c) 挖掘铲面力学分析

图 11 挖掘铲受力模型分析

Fig. 11 Analysis of force model of excavating shovel

$$F_1 = \frac{G_1}{Z} = \frac{KS_1 + fl}{\sin\omega + \cos\omega} + \frac{KS_1}{Z(\sin\gamma + \cos\gamma)} \quad (7)$$

式中　F_1——挖掘阻力，N

G_1——挖掘铲法向载荷，N

G_2——挖掘铲横向载荷，N

l——挖掘部件幅宽，mm

K——土壤附着力，N/cm^2

S_1——挖掘部件接触面积，cm^2

f——纯切削力，N

ω——阻力角，(°)

μ——土壤与金属摩擦因数

v_1——挖掘铲前进速度，m/s

v_2——铲面土壤滑切速度，m/s

Z——常数

根据挖掘铲力学模型可知，挖掘阻力受挖掘铲几何尺寸、土壤附着力、根土粘结力、入土角度、挖掘速度等因素的影响。其中根土粘结力、挖掘铲几何尺寸、入土角度影响最为直接。对挖掘阻力 F_1 进行多元求导求得入土角 γ 和阻力角 ω 的最小值。

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F_1}{\partial \omega} = \dfrac{-(KS_1 + fl)}{(\sin\omega + \cos\omega)^2}(\cos\omega - \sin\omega) = 0 \\ \dfrac{\partial F_1}{\partial \gamma} = \dfrac{-KS_1}{Z(\sin\gamma + \cos\gamma)^2}(\cos\gamma - \sin\gamma) = 0 \\ \left(0 \leqslant \omega \leqslant \dfrac{\pi}{2}, 0 \leqslant \gamma \leqslant \dfrac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

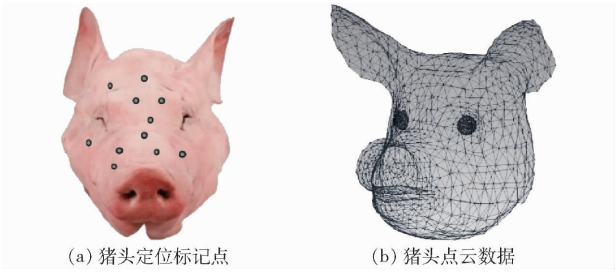
计算得入土角 γ 和阻力角 ω 越靠近 45°时挖掘阻力 F_1 越小。参考文献[7－8]得入土角 γ 范围为 22°～33°、阻力角 ω 范围为 28°～35°，仿生挖掘铲体设计尺寸（长 × 宽 × 厚）为 360 mm × 150 mm × 8 mm、铲尖半角 60°。

3　三七仿生挖掘铲设计

动物的生存本能进化出适应自然的生理构造，也为分析和解决农业问题提供了思路。目前已有学者利用蝼蛄爪趾的抛挖优势设计旋耕刀具[2]；模拟天牛牙齿的啮合过程设计切割刀刃部[5]。其中野猪头鼻部对土壤的翻动、拱抬、挤压、破碎与挖掘铲的作用十分相似[26]，借鉴野猪头鼻的挖掘优势，对野猪头鼻部分进行逆向工程建模提取点云数据，应用于三七仿生挖掘铲的几何设计。

3.1　野猪头鼻部建模

野猪的毛发对三维扫描仪的识别有干扰，为避免造成混淆，忽略野猪头鼻部的毛发进行扫描，采集点云数据建立模型。首先在猪头上标记定点标识，通过环绕扫描建立三维模型，利用后处理软件去除噪点、修剪和光滑细节，结果如图 12 所示。



(a) 猪头定位标记点　　(b) 猪头点云数据

图 12　猪头三维扫描建模

Fig. 12　Three-dimensional scanning modeling of pig head

3.2　仿生挖掘铲结构设计

采集到猪头鼻部的三维模型后，通过 SolidWorks 对猪头鼻部的正面曲线、侧面曲线进行散点坐标采集并进行二次项拟合，根据挖掘铲设计参考尺寸要求选择拟合曲线的长度范围，仿生挖掘铲由正向3 条间隔 90 mm 的素线和侧向 1 条正脊线构成，结构如图 13 所示。

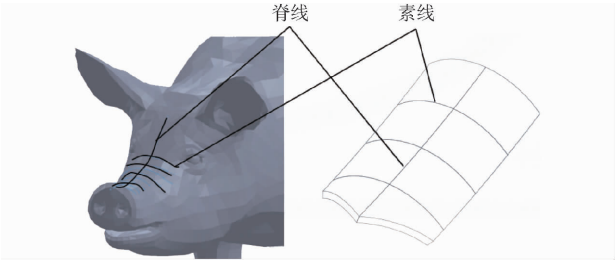


图 13　仿生挖掘铲素线、脊线示意图

Fig. 13　Schematic of bionic excavation shovel line and ridge line

对素线及脊线的散点坐标进行二次项曲线拟合，考虑挖掘铲的建模便利，将脊线拟合曲线最低点移动至坐标原点，素线拟合曲线调整为偶函数，得到最终拟合曲线方程，素线 1、2、3 拟合方程为：$y_1 = -0.021\,0x^2 + 2.33$ ($R = 0.983\,0$)、$y_2 = -0.018\,2x^2 + 6.47$ ($R = 0.993\,7$)、$y_3 = -0.021\,6x^2 + 10.68$ ($R = 0.972\,4$)，脊线 $y_4 = 0.039\,6x^2 - 0.062\,2x + 0.318\,3$ ($R = 0.997\,6$)。据素线脊线方程及设计参考尺寸，根据农艺要求设挖掘铲总成幅宽为 1 500 mm，考虑挖掘铲片间隙的漏土作用，设置铲片间隙为 75 mm，共 7 个铲片，仿生挖掘铲的设计尺寸（长 × 宽 × 厚）为 360 mm × 150 mm × 10 mm、铲尖半角 60°。通过 SolidWorks 设计三七仿生挖掘铲，如图 14 所示。

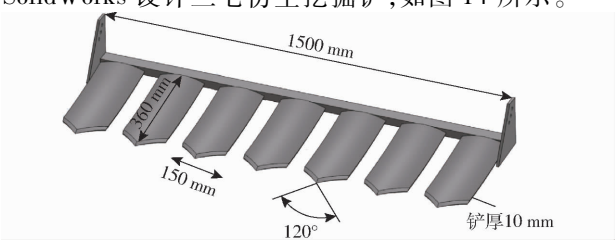


图 14　仿生挖掘铲三维模型

Fig. 14　3D model of bionic excavating shovel

4 仿真试验

目前三七采挖大多采用平面挖掘铲，平面挖掘铲制造简单、受力情况易于分析、影响挖掘的因素较少，且对比试验主要考察仿生挖掘铲铲面结构的优势，故开展仿生挖掘铲与平面挖掘铲的对比试验。为消除尺寸因素对试验结果的影响，平面挖掘铲的设计尺寸和仿生挖掘铲基本一致，考虑加工工艺而略有调整，平面挖掘铲的设计尺寸（长×宽×厚）为 358 mm×140 mm×8 mm、铲尖半角 60°。用 SolidWorks 进行建模，结果如图 15 所示。挖掘总幅宽 1 500 mm，铲片间隙为 87 mm，铲片数量为 7。

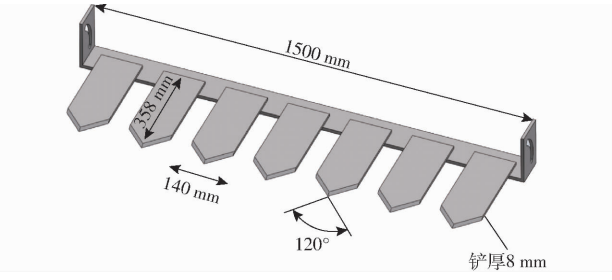


图 15 平面挖掘铲三维模型

Fig. 15 3D model of plane excavation shovel

4.1 挖掘过程对比试验

模拟三七收获挖掘作业过程开展仿真试验，1～25 s 时设置物理本征参数等，生成根土离散元复合模型；加载挖掘铲模型设置入土角为 30°、挖掘深度为 260 mm，添加挖掘铲的 Linear－Translation 直线运动，运动速度为 1 m/s，仿真时间步长为 0.1 s，仿真总时长为 25～30 s，挖掘作业时长为 5 s。其中 25～26 s 为挖掘铲初始入土阶段，26～29 s 为连续工作阶段，29～30 s 为挖掘阻力急剧上升且稳定阶段。为便于观察，对仿真对比试验结果剖切观察，如图 16 所示。

由图 16 对比知，在 25～26 s 挖掘入土阶段，挖掘铲铲尖入土后土壤开始出现扰动；26～29 s 挖掘铲完全入土连续作业，根土离散元复合模型沿铲面向后滑移，铲面土壤颗粒开始堆积，铲体四周的土壤粘结失效区域范围变大，对比发现此时仿生挖掘铲铲面边缘土壤颗粒流动性大于平面铲面；在 29～30 s 时，挖掘阻力开始急剧上升，平面铲铲面出现壅土现象，仿生铲铲面、铲面边缘、铲尖的土壤颗粒仍保持优于平面挖掘铲的滑移速度。

4.2 颗粒位移流向对比试验

仿真试验中颗粒位移流动间接反映离散元模型受力后的变化情况，可作为挖掘铲面结构优良的评价方法之一。对平面和仿生铲面上的根茎颗粒和土壤颗粒进行位移流向追踪，计算颗粒受力后的三轴 X、Y、Z 轴平均位移距离，根据位移流向曲线的变化，对比两种挖掘铲面结构对根土离散元复合模型的位移作用，作为挖掘铲减阻的依据。

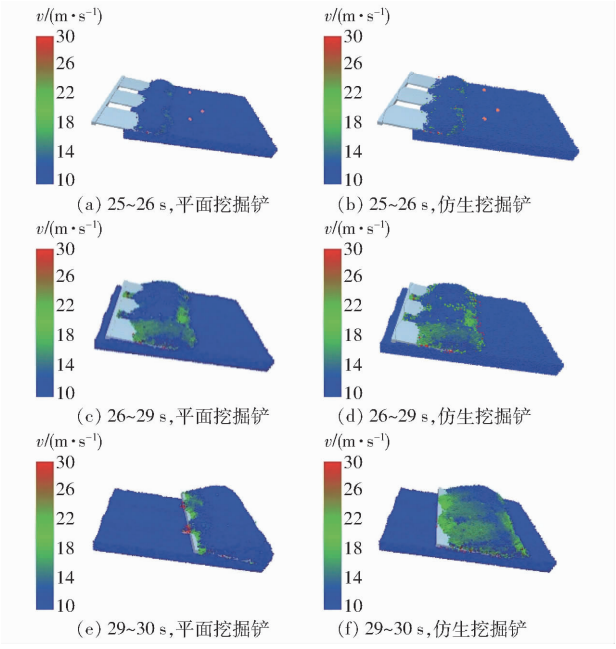


图 16 仿真挖掘对比试验剖视图

Fig. 16 Simulation mining comparative test section views

4.2.1 三七根茎颗粒位移流向对比

三七采挖过程中，根茎受到土壤粘结力、挖掘前进速度的共同作用。根土复合体被挖起后，随铲面向后运动，根土间产生拉伸破碎、压缩破碎以及剪切破碎现象，导致土壤破碎流动、根茎滑移，如图 17 所示。

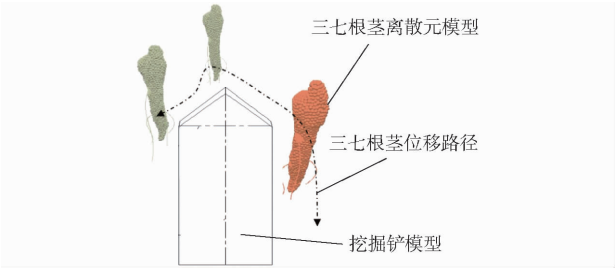


图 17 仿真试验根茎颗粒位移流向示意图

Fig. 17 Simulation test of displacement and flow direction of rhizome particles

截取 25～30 s 的仿真过程，通过 EDEM 后处理模块和 Origin 软件分析得到时间－位移曲线，如图 18 所示。分别对 7 片铲面进行位移曲线提取，图例 1～7 为挖掘铲各铲片序号，图 18a、18b 为 X 方向（挖掘前进方向）的运动；图 18c、18d 为 Y 方向（铲面横向）的左右滑移运动；图 18e、18f 为 Z 方向（垂直于铲面）的上下运动；分析可知平面铲挖掘时三七根茎位移主要在 X 向，X 向平均位移为 316.93 mm，Y 向和 Z 向的位移变化不大，Y 向与 Z

向的平均位移为 60.47、67.98 mm；仿生铲挖掘时三七根茎 3 个方向都有较好的位移表现，且随仿真时间呈上升趋势，平均位移为 X 向 341.13 mm、Y 向 190.17 mm、Z 向 179.95 mm。

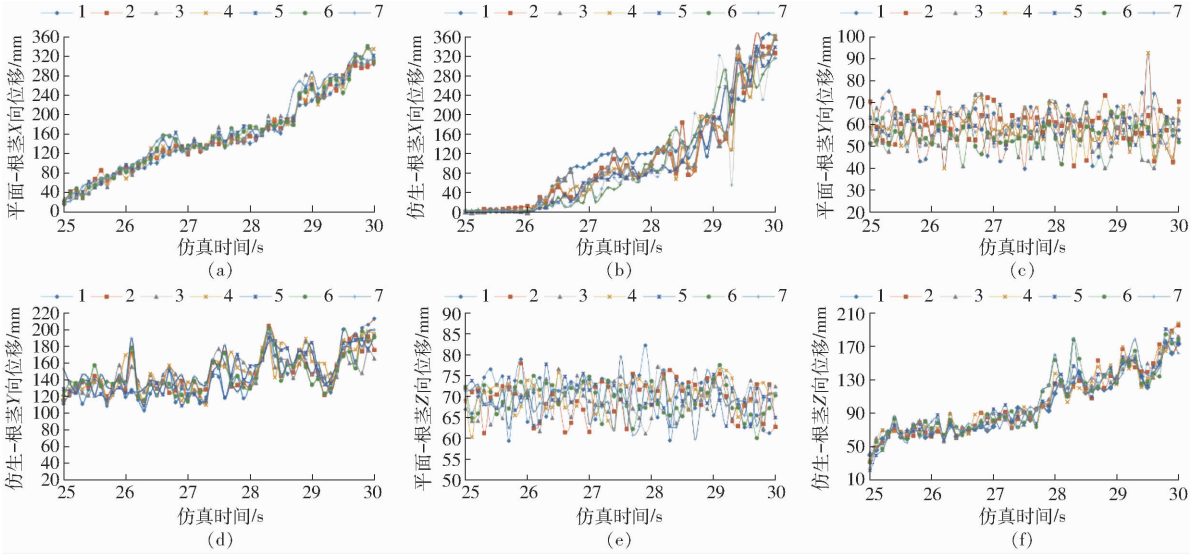


图 18　根茎位移仿真曲线

Fig. 18　Simulation test root displacement distance

4.2.2　土壤颗粒位移流向对比

仿真试验中，由于土壤颗粒数量巨大，难以捕捉到每个颗粒的位移，故选择挖掘铲尖入土时首先接触的土壤颗粒，分别对平面铲和仿生铲铲尖首先接触的土壤颗粒进行位移流向追踪，并计算 X、Y、Z 轴的平均位移，分析土壤颗粒的位移流向趋势，一定程度上可表示挖掘过程中土壤颗粒的位移流向情况。截取 25 ~ 30 s 挖掘全过程时段，土壤颗粒运动如图 19 所示。

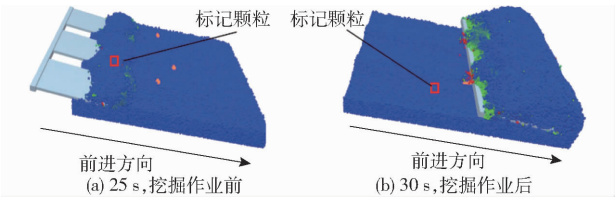


图 19　土壤颗粒位移流向结果

Fig. 19　Simulation tests of soil particle displacement direction

使用 EDEM 后处理功能导出数据，通过 Origin 软件分析得到 25 ~ 30 s 的时间-位移曲线，如图 20 所示。对比分析 X 向位移（图 20a、20b）可知，仿生挖掘铲和平面挖掘铲的 X 向平均位移分别为 310.03、286.72 mm，在 26 ~ 28 s 时挖掘铲开始连续作业，土壤颗粒开始堆积，土壤颗粒出现抖动堆积上升，在 28 ~ 30 s 时到达要求挖掘深度 260 mm，位移曲线变化趋于平直；对比分析仿生挖掘铲和平面挖掘铲的 Y 向和 Z 向的位移（图 20c、20d 与图 20e、20f）可知，仿生铲面的结构优势开始凸显，Y 向和 Z 向的平均位移皆优于平面挖掘铲，Y 向平均位移为 173.35、115.36 mm，Z 向平均位移为 122.52、94.67 mm；在 Y 向 28 ~ 30 s 时，仿生挖掘铲位移曲线相较于平面挖掘铲上升趋势较快，土壤颗粒在连续作业时沿着仿生铲面横向滑移从而减少壅土现象；在 Z 向 25 ~ 26 s 时，挖掘铲入土的初始阶段，土

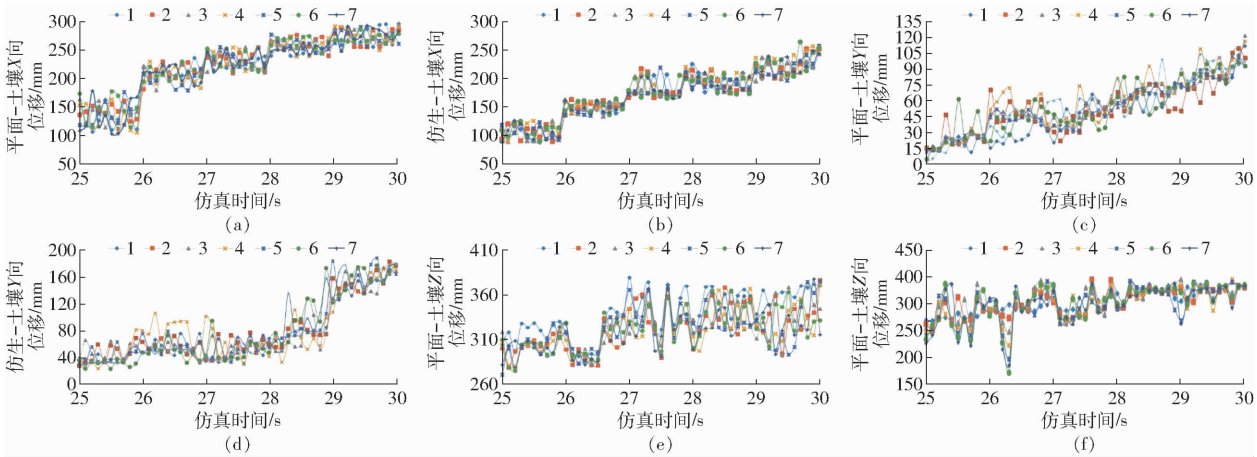


图 20　土壤颗粒位移仿真曲线

Fig. 20　Simulation tests of soil particle displacement distance

壤颗粒沿着铲尖和铲面上升,位移曲线出现波动,在26 s后受限于入土角度和铲体长度,仿生铲和平面铲的位移曲线变化趋于平稳。通过对比分析土壤颗粒的三轴位移曲线趋势可知,仿生铲面的颗粒流动性优于平面铲面。

4.3 减阻性能对比试验

对挖掘阻力进行分析,由式(7)可知挖掘铲阻力受挖掘铲尺寸、土壤附着力、根土粘结力、入土角度、挖掘前进速度、摩擦因数等共同影响;选用JKR模型模拟根土粘结关系建立根土离散元复合模型,旨在利用仿真试验分析挖掘阻力大小和来源,通过仿真试验可知挖掘阻力主要在X向,利用EDEM后处理Analyst模块导出所有挖掘铲面的X向阻力值,通过Origin软件分析25~30 s时的阻力曲线。衡量挖掘阻力的指标是减阻率,对比挖掘阻力变化曲线并计算最大减阻率,减阻率计算公式为

$$\eta = \frac{F_p - F_f}{F_p} \times 100\% \tag{9}$$

式中 F_p——平面挖掘铲所受最大阻力,N

F_f——仿生挖掘铲所受最大阻力,N

25~30 s时挖掘阻力仿真曲线如图21所示,阻力曲线显示挖掘铲在28.5~29 s时达到阻力峰值,在29 s后阻力曲线开始趋于稳定。图21a为平面挖掘铲阻力,平面铲在26~27 s时产生挖掘阻力波动,27 s时开始入土深入后,在28 s后挖掘阻力开始激增趋势,29~30 s进入连续作业状态挖掘阻力开始趋于稳定,所受平均最大阻力为1 929.32 N,同一时刻的挖掘阻力远大于仿生挖掘铲;图21b为仿真挖掘铲阻力,仿生铲在27~28 s时,由于铲面结构作用,阻力开始突变上升继而下降后又开始上升,在29 s后达到最大阻力阶段,仿生铲所受平均最大阻力为1 559.76 N;相较于平面挖掘铲所受最大阻力,仿生挖掘铲的挖掘减阻率为19.15%。

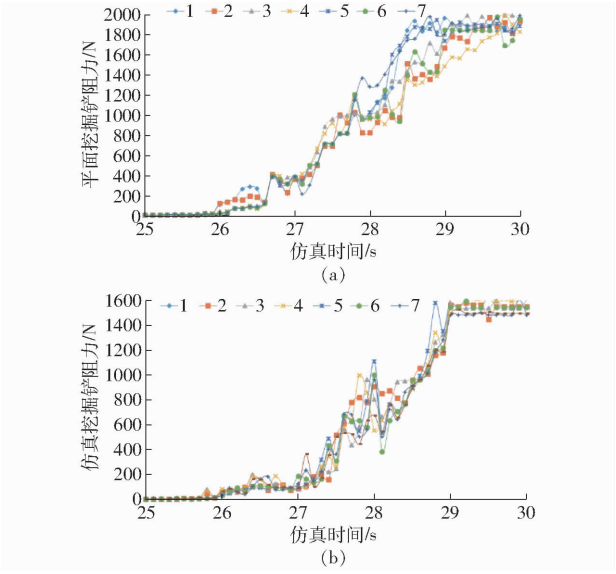


图21 挖掘铲阻力仿真曲线

Fig. 21 Comparative simulation tests of excavating shovel blocked

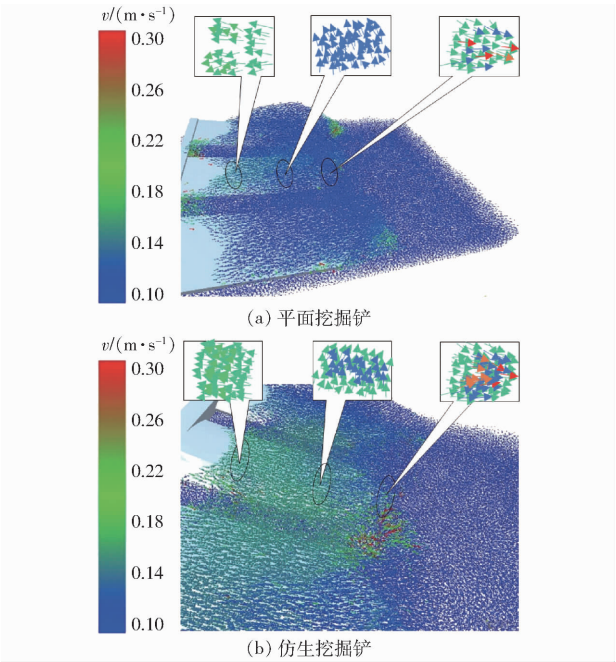


图22 土壤颗粒运动矢量图

Fig. 22 Soil particle motion vector maps

4.4 挖掘机理分析

为探究挖掘机理,明晰挖掘阻力产生的原因,截取挖掘阻力最大时刻29 s的局部放大图,利用后处理工具Analyst将土壤颗粒运动转变为矢量图。如图22所示,其中矢量箭头指向表示方向、长短表示速度大小、颜色为速度变化趋势;通过分析挖掘铲周边颗粒的速度矢量流向,判断阻力最大时颗粒的运动状态和运动趋势,结合铲面结构进行分析。

在29 s时,挖掘铲周围的土壤颗粒速度有了明显变化,铲面边缘土壤颗粒受到扰动最大,相对速度较快呈现红色;铲面前端土壤颗粒速度方向与X向一致,挖掘阻力向前;铲面中端土壤颗粒速度方向逐渐变为Z向,挖掘阻力由侧面开始向上,开始堆积形成壅土现象;同一时刻,仿生挖掘铲周边的土壤颗粒流动速度大于平面挖掘铲,土壤颗粒速度流向四散;铲面后端承载土壤颗粒相对较少,没有明确的矢量流向。通过分析土壤颗粒速度流向可知,挖掘阻力主要来自铲面前中端受力。

相较平面挖掘铲,仿生铲面为仿生曲面结构,正向和侧向两面都是曲面结构,根土离散元复合体在三轴方向都会产生破碎、滑移、滚动,速度流向呈现空间发散趋势,这说明仿生铲面具有良好的土壤流动性和结构引流作用,铲面承载的土壤颗粒数量下降减少壅土,由此仿生挖掘铲的挖掘阻力减小。

通过仿真对比试验，对三七根茎、种植土壤颗粒进行了位移流向追踪比较、挖掘阻力曲线变化对比、分析了铲面的挖掘机理，仿真结果表明仿生挖掘铲的颗粒流动性优于平面铲，所受挖掘阻力更小，有良好的减阻性，仿真试验初步验证了仿生挖掘铲的仿生设计理论分析准确、结构合理可行。

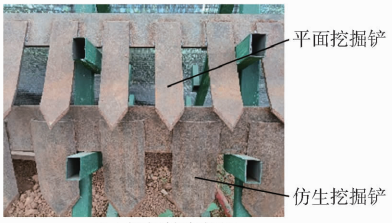
5　试验

5.1　试验仪器及设备

试验场地为云南省中药材机械化研究中心，试验平台为第三代温室自走式三七收获机，加装仿生挖掘铲和平面挖掘铲在种植土槽中进行试验，如图 23 所示。自走式三七收获机参数如表 4 所示。



(a) 自走式三七收获机



(b) 挖掘铲实物图

图 23　试验场地及阻力采集设备

Fig. 23　Test site and resistance collection equipment

表 4　第三代温室自走式三七收获机参数

Tab. 4　Parameters of the third generation greenhouse self-propelled *Panax notoginseng* harvester

参数	数值
整机质量/kg	800
作业速度/(m·s^{-1})	0 ~ 1
作业幅宽/mm	1 500
挖掘深度/mm	150 ~ 260
单次作业距离/m	50
整机尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	2 300 × 2 040 × 1 200
抖动振幅/Hz	1.6 ~ 2.4

挖掘阻力采集设备为 INV3018CT 型便携式采集仪。选用电阻式应变片，将应变片进行横向和纵向标定得标定曲线方程，为保证试验精度将应变片长度方向与前进方向布置一致，应变片为 BX120 - 50AA 型电阻应变片、电阻(119.9 ± 0.1) Ω、灵敏系数 1.08% ~ 3.08%、精度等级 A 级，应变片尺寸(栅长 × 栅宽) 50 mm × 3 mm、标定曲线方程 $y_5 = 97.441x - 69.497$，试验场地及阻力采集设备如图 23 所示。

利用千眼狼高速摄像机进行图像采集。采集系统由高速摄像机、便携式计算机、三脚架、光源灯、数据线、电源线等组成(图 24)。为避免采集图像失拟，将高速摄像机垂直布置于整机前进方向侧向，镜头与地面的垂直距离为 1 300 mm，与地面水平夹角为 35°，调试后确保图像清晰无缩放，试验时还需要调整光源对准挖掘铲铲面。

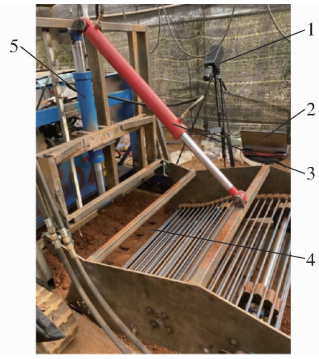


图 24　高速摄像试验装置

Fig. 24　High-speed photographic test device

1. 千眼狼高速摄像机　2. 便携式计算机　3. 入土角度调节油缸　4. 挖掘铲　5. 挖掘深度调节油缸

5.2　土槽试验

5.2.1　土壤颗粒位移流向试验

利用千眼狼高速摄像机采集图像以验证位移流向试验结果。大田环境下三七根茎被土壤包裹，挖掘运动过程中土壤易掩埋三七，高速摄影难以捕捉和观察根茎位移流向，故土槽试验只考虑土壤颗粒流向，调节收获机行进速度为 1 m/s、挖掘深度 260 mm、入土角 30°，为保证试验数据精准，将土槽分为加速区 0 ~ 2 m、中间有效距离区 2 ~ 8 m、减速区 8 ~ 10 m。设置高速摄像机时间分辨率为 1 000 f/s，采集时间 6 s。捕捉仿生挖掘铲周围的土壤颗粒流向(图 25)，基本与仿真土壤颗粒流向趋势一致。

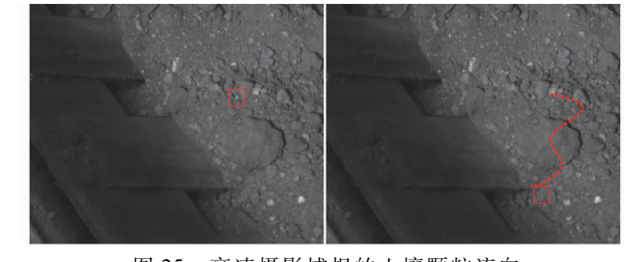


图 25　高速摄影捕捉的土壤颗粒流向

Fig. 25　High-speed photography captured flow of soil particles

5.2.2　挖掘铲阻力试验

进行挖掘阻力对比土槽试验，云南温室三七种植土槽深度 0.5 m、槽宽 1.5 m、槽长 50 m，收获机行走速度为 1 m/s，试验距离为 10 m，同样为保证试验

的准确性,取土槽 0 ~ 2 m 为整机加速区、2 ~ 8 m 为有效试验距离区、8 ~ 10 m 为整机减速区;为保证试验精度,5 组试验后校正电阻应变片 1 次;试验先取得空载阻力,待挖掘深度达 260 mm 后测得相对挖掘阻力,与空载挖掘阻力之差即实际挖掘阻力值,然后计算仿生挖掘铲的土槽试验减阻率。结果如表 5 所示。

表 5 挖掘阻力田间对比试验结果

Tab. 5 Field contrast test of excavation resistance

试验号	空载阻力 F_k/N	仿生挖掘阻力 F_f/N	平面挖掘阻力 F_p/N	减阻率 η/%
1	8.65	1 108.50	1 517.49	26.95
2	8.65	1 213.48	1 608.72	24.57
3	8.65	1 160.78	1 559.75	25.58
4	8.65	1 204.20	1 570.91	23.34
5	8.65	1 239.34	1 542.04	19.63
6	9.37	1 204.48	1 593.17	24.40
7	9.37	1 191.62	1 504.30	20.79
8	9.37	1 217.76	1 575.43	22.70
9	9.37	1 223.90	1 606.56	23.82
10	9.37	1 307.04	1 617.60	19.20
11	9.47	1 201.18	1 668.82	28.02
12	9.47	1 212.32	1 639.95	26.08
13	9.47	1 148.46	1 597.08	28.09
14	9.47	1 274.60	1 642.21	22.39
15	9.47	1 200.74	1 673.34	28.24
均值		1 207.23	1 594.49	24.29

综上,仿生挖掘铲和平面挖掘铲的平均最大阻力为 1 207.23、1 594.49 N,仿生挖掘铲的平均减阻率为 24.29%,土槽试验证明仿生挖掘铲的减阻特性优于平面挖掘铲,且与仿真试验的减阻率 19.15% 相比误差在可控范围内,证明三七根茎及种植土壤的离散元复合模型准确可靠,仿生挖掘铲的力学模型准确,几何设计合理可行。

6 结论

(1)对三七根茎和种植土壤进行物理参数测定,采用三维扫描逆向工程技术建立三七根茎的三维模型,分析湿润土壤和根茎间的粘结机理关系,结合三七种植农艺,准确建立了根土复合的 JKR 离散元粘结模型,为挖掘对比仿真试验的开展做准备。

(2)简化挖掘铲对于土壤的挖掘作用,建立并分析挖掘铲的理论力学模型,确定仿生挖掘铲的基本设计参数取值,采集野猪头三维模型的鼻部点云数据,拟合散点求得仿生设计曲线的表达式,利用 SolidWorks 建立仿生挖掘铲的三维模型。

(3)开展挖掘仿真对比试验,对根茎颗粒和土壤颗粒进行 X、Y、Z 三轴位移流向追踪,仿生挖掘铲面的三轴颗粒位移大于平面挖掘铲,所受平均挖掘阻力小于平面挖掘铲,得仿生挖掘铲的仿真试验减阻率为 19.15%;对比仿生挖掘铲和平面挖掘铲的挖掘过程,可知仿生铲面由于仿生曲线结构,相较于平面挖掘铲具有更好的引流和减阻作用。

(4)开展土槽对比试验,利用高速摄像机对土壤颗粒进行追踪,验证了土壤颗粒流向与仿真结果趋势一致;利用电阻应变片采集挖掘阻力计算得仿生挖掘铲的平均减阻率为 24.29%。与仿真试验减阻率 19.15% 相比误差可控,证明了离散元模型建立准确可靠,仿生挖掘铲的力学模型分析准确,仿生几何设计合理可行,能够满足三七挖掘的减阻要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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 tillage knife based on *Oriental mole* cracker claw and toe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):55 - 63. (in Chinese)

[3] LI Junwei, JIANG Xiaohu, MA Yunhai. Bionic design of a potato digging shovel with drag reduction based on the discrete element method (DEM) in clay soil[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7096.

[4] 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 loosening shovel for returning corn straw to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):75 - 87. (in Chinese)

[5] 田昆鹏,李显旺,沈成,等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):56 - 61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and experiment of cutting blade of bionic hemp harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 56 - 61. (in Chinese)

[6] 樊昱. 基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
FAN Yu. Research on potato mining mechanism and bionic spade design based on discrete element method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[7] 于进川,张兆国,武占东,等. 悬挂式三年生三七挖掘收获机的研制及试验[J]. 农机化研究,2016,38(4):130 - 133,164.
YU Jinchuan, ZHANG Zhaoguo, WU Zhandong, et al. Development and experiment of hanging triennial notoginseng harvester

[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(4):130 - 133,164. (in Chinese)
[8] 程一启,张兆国,张丹,等. 基于 EDEM 三七收获机组合式挖掘铲减阻效果研究[J]. 农机化研究,2019,41(2):55 - 60.
CHENG Yiqi, ZHANG Zhaoguo, ZHANG Dan, et al. Study on drag reduction effect of combined excavating shovel in notoqi harvesting unit based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(2):55 - 60. (in Chinese)
[9] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):340 - 347.
QI Yingchun, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Soil aggregate composition and stability of soil aggregates under different land use patterns[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(1):340 - 347. (in Chinese)
[10] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. Discrete element analysis of subsoiling process in wet clay paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):38 - 48. (in Chinese)
[11] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9):58 - 65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical properties of corn straw in crushing process[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(9):58 - 65. (in Chinese)
[12] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Soil model parameter calibration method based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):78 - 85. (in Chinese)
[13] 赖庆辉,袁海阔,胡子武,等. 三七种苗物料特性研究及离散元法参数标定[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(2):74 - 79.
LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Study on material properties of *Panax notoginseng* seedlings and parameter calibration by discrete element method[J]. Journal of Yangzhou University (Agriculture & Life Science Edition),2018,39(2):74 - 79. (in Chinese)
[14] 刘宏俊,张文毅,纪要,等. 基于离散元法的稻麦周年地区土壤仿真物理参数标定[J]. 中国农机化学报,2020,41(12):153 - 159.
LIU Hongjun, ZHANG Wenyi, JI Yao, et al. Physical parameter calibration of soil simulation in rice-wheat annual region based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization,2020,41(12):153 - 159. (in Chinese)
[15] 曹晓兴. 逆向工程模型重构关键技术及应用[D]. 郑州:郑州大学,2012:11 - 13.
CAO Xiaoxing. Key technology and application of reverse engineering model reconstruction[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2012:11 - 13. (in Chinese)
[16] 金涛,陈建良,童水光,等. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程,2002(16):86 - 92,6.
JIN Tao, CHEN Jianliang, TONG Shuiguang, et al. Research progress of reverse engineering technology[J]. China Mechanical Engineering,2002(16):86 - 92,6. (in Chinese)
[17] 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. Modeling and experiment of rice seed discrete element based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(15):294 - 300. (in Chinese)
[18] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):123 - 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters of *Panax notoginseng* seeds based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):123 - 132. (in Chinese)
[19] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):227 - 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration of rice seed discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):227 - 235. (in Chinese)
[20] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73 - 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for stem breakage in feed rapeseed harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):73 - 82. (in Chinese)
[21] 吴俊. 基于 EDEM 的宝塔菜收获机的设计及仿真分析[D]. 银川:宁夏大学,2018:19 - 20.
WU Jun. Design and simulation analysis of pagoda vegetable harvester based on EDEM[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018:19 - 20. (in Chinese)
[22] 徐泳,李红艳,黄文彬. 耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J]. 农业工程学报,2003,19(2):34 - 38.
XU Yong, LI Hongyan, HUANG Wenbin. Three-dimensional discrete element modeling and simulation scheme planning for tillage soil dynamics[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(2):34 - 38. (in Chinese)
[23] 李振炜,张光辉,耿韧,等. 黄土丘陵区浅沟表层土壤粘结力状态空间模拟[J]. 农业机械学报,2015,46(6):175 - 182.
LI Zhenwei, ZHANG Guanghui, GENG Ren, et al. Spatial simulation of surface soil cohesion in shallow gully in loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):175 - 182. (in Chinese)
[24] 邢欢欢. 基于离散单元法的机械式挖掘机工作阻力模拟[D]. 沈阳:东北大学,2014:10 - 13.
XING Huanhuan. Working resistance simulation of mechanical excavator based on discrete element method[D]. Shenyang: Northeastern University,2014:10 - 13. (in Chinese)
[25] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:22 - 23.
[26] 许亮. 野猪头部三维几何模型逆向工程研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
XU Liang. Study on reverse engineering of 3D geometric model of wild boar's head[D]. Changchun: Jilin University,2006. (in Chinese)